



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Posgrado en Ciencias de la Tierra
Instituto de Geología
Edafología

**Enmiendas orgánicas e inorgánicas y maguey mezcalero; *Agave angustifolia*
Haw, en el intemperismo de tepetate fragmentado en condiciones de
invernadero.**

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

PRESENTA:

Atilano Alvarado Arturo H.

TUTOR PRINCIPAL:

Dr. Flores Román David, Instituto de Geología

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

Dr. Jorge Gama Castro, Instituto de Geología
Dra. Blanca Prado Pano, Instituto de Geología
Dr. Julio Campo Alves, Instituto de Ecología
Dr. Arturo Aguirre Gómez, FES Cuautitlán

México, D.F., Mayo, 2014



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.

Hoja de datos del Jurado

1. Datos del alumno

Atilano
Alvarado
Arturo Huitzilihuitl
56 85 43 50 arturoati@hotmail.com
Universidad Nacional Autónoma de México
Posgrado en Ciencias de la Tierra
Instituto de Geología
095152925

2. Datos del tutor

Dr.
David
Flores
Román

3. Datos del sinodal 1.

Dr.
Jorge E.
Gama
Castro

4. Datos del sinodal 2.

Dra.
Blanca
Prado
Pano

5. Datos del sinodal 3.

Dr.
Homero Julio Eudes
Campo
Alves

6. Datos del sinodal 4.

Dr.
Arturo
Aguirre
Gómez

7. Datos de la tesis.

Enmiendas orgánicas e inorgánicas y maguey mezcalero; *Agave angustifolia* Haw, en el intemperismo de tepetate fragmentado en condiciones de invernadero.
129 p.
2014

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme un espacio, por fomentar el desarrollo integral de su comunidad, por inculcarme sus valores, por su nobleza sin límites.

Al Instituto de Geología, cuyo personal e instalaciones permitieron llevar a término la presente investigación.

Al Dr. David Flores Román, por constituir una guía permanente para mí y para el resto de sus alumnos, tanto en aspectos académicos como en cuestiones cotidianas. Por una vida al servicio de su universidad, de su pueblo.

A los miembros del Jurado: Dr. Jorge Gama Castro, Dra. Blanca Prado Pano, Dr. Julio Campo Alves y Dr. Arturo Aguirre Gómez porque el interés y detalle con el que realizaron sus observaciones y comentarios permitieron el mejoramiento sustancial de éste trabajo.

Al Técnico Académico Biol. Jorge René Alcalá Martínez, por la asistencia y apoyos recibidos para realizar las determinaciones de laboratorio, desarrollo de equipo, tratamiento y presentación de resultados, además de los consejos para desenvolverme en la vida profesional.

A la técnico académico M. en C. Iris Suárez Quijada por la asistencia para hacer uso de las instalaciones del Invernadero del Departamento de Edafología, donde se desarrolló la parte experimental de este proyecto.

Al STUNAM, por permitirme continuar con mi formación académica en beneficio de mi desempeño laboral.

A mi familia, porque su amor y presencia son la razón principal para buscar mi superación.

A mis amigos, por su compañía, por obligarme a reír, por agrandar mis dudas, por suavizar mis penas; gracias: Alma, Ari, Bere, Caro, Daniel, Diana, Eli, las dos Fabys, Horas, Ingrid, Ise, Kathia, Luz, Mary, Mario, Montse, Rak, Sara y Wendy

A los que se han ido, porque su ejemplo y recuerdo perduran.

A

Mi familia

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	8
I. RESUMEN	10
II. INTRODUCCIÓN	12
III. MARCO TEÓRICO	14
1. Tepetate.....	14
a) Definición, Distribución y Problemática	14
b) Características	16
<i>Características Físicas</i>	16
<i>Características Químicas</i>	17
<i>Mineralogía</i>	19
<i>Micromorfología</i>	19
c) Origen	20
<i>Origen Geológico</i>	20
<i>Origen Pedológico</i>	21
<i>Degradación del Suelo</i>	22
<i>Otras Capas Endurecidas</i>	23
d) Habilitación	23
<i>Antecedentes</i>	24
<i>Consideraciones para la Habilitación</i>	25
<i>Prácticas de uso</i>	26
<i>Propuestas de Habilitación</i>	27
<i>Marco Histórico</i>	29
2. Especie Vegetal.....	31
a) Generalidades.....	31
<i>Usos e Importancia</i>	32
<i>Prácticas de Cultivo</i>	33
b) Agave como Variable Experimental	34
3. Intemperismo	35
a) Tipos e Implicaciones	35
b) Repercusiones Ambientales	35
c) Influencia de los Organismos Vivos en el Intemperismo.....	36

IV. OBJETIVOS	37
1. Generales	37
2. Particulares	37
V. HIPÓTESIS	38
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	39
1. Sitio de Muestreo	39
2. Diseño Experimental.....	40
3. Descripción del Experimento	42
4. Parámetros de Estudio.....	44
a) Propiedades del Tepetate	44
<i>Toma de Muestras Inalteradas</i>	44
<i>Propiedades Físicas</i>	45
<i>Características Químicas</i>	49
<i>Análisis Estadísticos</i>	52
b) Agave.....	52
<i>Características Morfológicas</i>	52
<i>Biomasa</i>	52
<i>Calidad del Agave (extracto)</i>	52
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
1. Parámetros del Tepetate	54
a) Propiedades Físicas	54
<i>Densidad Aparente</i>	55
<i>Conductividad Hidráulica</i>	56
<i>Capacidad de Campo, Punto de Marchites Permanente, Retención de Agua Disponible</i> ..	63
<i>Clases de Tamaño de Partícula</i>	66
<i>Estabilidad de las Clases de Tamaño de Partícula</i>	71
b) Características Químicas	77
<i>pH</i>	78
<i>Materia Orgánica</i>	82
<i>Capacidad de Intercambio Catiónico</i>	87
<i>Bases Intercambiables</i>	91
<i>Óxidos Elementos Mayores</i>	97
<i>Índice de Parker</i>	99
<i>Relación Sílice-Aluminio</i>	100
<i>Índice de Alteración Química</i>	101

<i>Relación Bases-Alúmina y Bases-Sesquióxidos</i>	101
2. Parámetros del Agave.....	104
a) Características Morfológicas	104
b) Biomasa	107
c) Calidad del Agave.....	110
VIII. CONCLUSIONES	115
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118
Recursos En Línea	128
IX. APÉNDICES	129
Apéndice I. Condiciones Ambientales en el Invernadero	129
Apéndice II. Contenido nutrimental del estiércol vacuno	129
Apéndice III. Figuras relativas a las condiciones experimentales	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura1. Distribución de tepetates en la República Mexicana	15
Figura2. Vista aérea de la zona donde se recolectó el material geológico.	39
Figura 3. (A) Barrena diseñada para obtener muestras inalteradas a diferentes profundidades.	45
Figura 4. Determinación de la conductividad hidráulica.....	46
Figura 5. (A) Conductividad hidráulica	56
Figura 6. (A) Comparación entre los valores promedio de conductividad hidráulica	57
Figura 7. Comparación de la conductividad hidráulica entre tratamientos.....	58
Figura 8. Comparación de la conductividad hidráulica entre T0 y el resto de los tratamientos.....	59
Figura 9. Tamaño de fragmentos encontrados en las muestras de conductividad hidráulica	60
Figura 10. Fracción <0.25 mm contenida en las muestras donde se evaluó CH.....	61
Figura 11. Capacidad de Campo y Punto de Marchites Permanente.....	63
Figura 12. Relación de porcentajes de fragmentos menores y mayores de 2 mm	64
Figura 13. Distribución porcentual de las clases de tamaño de partícula (CTP)	67
Figura 14. Distribución porcentual de las clases de tamaño de partícula estables	72
Figura 15. Comparación del diámetro de las CTP obtenidas de las pruebas de CTP y ECT.....	75
Figura 16. Comparación entre el pH obtenido con agua y el determinado con CaCl ₂	78
Figura 17. Contenido porcentual de materia orgánica	82
Figura 18. Capacidad de Intercambio Catiónico.....	87
Figura 19. Bases Intercambiables (Ca ²⁺ y Mg ²⁺).....	91

Figura 20. Bases Intercambiables (Na ⁺ y K ⁺)	92
Figura 21. Diferencias de parámetros morfológicos promovidos por el estiércol	105
Figura 22. Diferencias en la producción de biomasa del agave, promovidas por el estiércol	108
Figura 23. Diferencias en la cantidad de jugo producido por el agave	111
Figura 24. Cantidad de jugo en relación con el peso del agave	112
Figura 25. Representación gráfica de la temperatura (°C).....	130
Figura 26. Representación gráfica de la humedad (%).....	130
Figura 27. Representación gráfica de la radiación solar (W/m ²).....	131
Figura 28. Tepetate recolectado en el municipio Tetela del Volcán	131
Figura 29. Instalación de las unidades experimentales en el invernadero	132
Figura 30. Empaquetamiento de las partículas de tepetate por parte de las raíces del agave	132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Concentraciones máximas y mínimas de MO, C, N y P reportadas para tepetate	18
Tabla 2. CIC y concentraciones máximas y mínimas de BI reportadas para tepetate	27
Tabla 3. Tratamientos establecidos.....	40
Tabla 4. Propiedades Físicas del Tepetate	54
Tabla 5. Tamaño de fragmentos que componían las muestras de conductividad hidráulica.....	60
Tabla 6. Porcentaje promedio del diámetro de partículas.....	66
Tabla 7. Influencia de la planta sobre el diámetro promedio de las partículas	69
Tabla 8. Porcentaje promedio de estabilidad en húmedo de las clases de tamaño de partícula.....	71
Tabla 9. Influencia de la planta sobre la estabilidad de las Clases de Tamaño de Partícula	74
Tabla 10. Influencia del estiércol sobre la estabilidad de las Clases de Tamaño de Partícula	74
Tabla 11. Influencia del fertilizante sobre la estabilidad de las Clases de Tamaño de Partícula	74
Tabla 12. Características Químicas del Tepetate	77
Tabla 13. Influencia de la planta sobre el pH	79
Tabla 14. Influencia del estiércol sobre el pH	80
Tabla 15. Influencia del fertilizante sobre el pH.....	80
Tabla 16. Carbono orgánico incorporado al tepetate bajo distintos tratamientos	83
Tabla 17. Carbono incorporado como proporción del carbono añadido.....	84
Tabla 18. Influencia de la planta sobre la materia orgánica	85
Tabla 19. Influencia del fertilizante sobre la materia orgánica.....	85

Tabla 20. Influencia del estiércol sobre la CIC.....	88
Tabla 21. Influencia de la planta sobre la CIC.....	89
Tabla 22. Influencia del fertilizante sobre la CIC.....	90
Tabla 23. Influencia del estiércol sobre el contenido de BI	94
Tabla 24. Influencia de la planta sobre el contenido de BI	94
Tabla 25. Influencia del fertilizante sobre el contenido de BI.....	95
Tabla 26. Concentración de óxidos de elementos mayores	97
Tabla 27. Índices de Intemperismo	98
Tabla 28. Morfología del Agave.....	104
Tabla 29. Influencia del Estiércol sobre la Morfología del Agave	105
Tabla 30. Biomasa de la planta.....	107
Tabla 31. Influencia del Estiércol sobre la Biomasa de la Planta	108
Tabla 32. Jugo extraído y Determinación Azucares Reductores Totales.....	110
Tabla 33. Influencia del estiércol en la producción de Jugo y Azucares Reductores Totales	111
Tabla 34. Influencia del fertilizante en la producción de Jugo y Azucares Reductores Totales	111

I. RESUMEN

Los tepetates son capas volcánicas endurecidas con amplia distribución en el territorio mexicano. Poseen densidades aparentes altas, porosidad baja, conductividades hidráulicas y retención de humedad bajas, contenido de materia orgánica, nitrógeno y fósforo escaso. Características que en conjunto limitan el ofrecimiento de servicios ambientales y por lo tanto; resultan improductivas desde el punto de vista agrícola.

El objetivo de este trabajo consistió en caracterizar las alteraciones provocadas por el cultivo de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw), y por la adición de estiércol bovino y fertilizante inorgánico, en algunas de las características físicas y químicas del tepetate fragmentado en condiciones de invernadero. Igualmente se evaluó la calidad del cultivo al final del experimento.

El tepetate utilizado se recolectó en el municipio "Tetela del Volcán", perteneciente al estado de Morelos, éste se roturó y tamizó hasta obtener la fracción de 2 a 10 mm y se colocó en macetas sin perforaciones. El diseño experimental abarcó tres factores, con distribución al azar. Los factores fueron: (1) Planta (con planta y sin planta), (2) Estiércol (con estiércol y sin estiércol), (3) Fertilizante inorgánico (fertilizante dosis baja, fertilizante dosis alta y sin fertilizante). Lo cual dio como resultado 12 tratamientos con cuatro repeticiones por tratamiento, resultando en 48 unidades experimentales. El agave utilizado consistió en individuos de 3 meses de edad de la especie *Agave angustifolia* Haw. El experimento tuvo una duración de 14 meses y se realizó en el invernadero del Instituto de Geología de la UNAM. Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza y una prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Dentro de los parámetros físicos; la densidad aparente, capacidad de campo y punto de marchites resultaron prácticamente sin diferencias entre tratamientos, mientras que la conductividad hidráulica disminuyó drásticamente por acción del estiércol y la planta.

Se encontraron diferencias en las clases de tamaño de partícula (excepto en las fracciones 2 a 5 mm) y en la estabilidad de las clases de tamaño de partícula (fracciones >5 y 2 a 3 mm), con respecto al material original.

En cuanto a las propiedades químicas; el pH se mantuvo en valores cercanos a la neutralidad en aquellos tratamientos con estiércol, mientras que la planta propició la acidificación. La materia orgánica se vio incrementada por el estiércol, y en menor grado, también por la especie vegetal. El rasgo de intemperismo más notable fue la pérdida de elementos solubles (bases).

El fertilizante químico no mostró grandes influencias sobre los parámetros evaluados.

Con respecto al agave: (a) Este creció mejor en los tratamientos que contaron con estiércol, sin embargo, la calidad del jugo obtenido de la maceración del tallo no varió entre tratamientos, resultando de buena calidad en todos los casos. (b) El tepetate roturado funcionó adecuadamente como sustrato para el establecimiento de cultivos de *Agave angustifolia* Haw en condiciones de invernadero.

II. INTRODUCCIÓN

En aproximadamente 30% de la superficie total del territorio mexicano pueden encontrarse capas endurecidas, entre las cuales se hallan las de origen volcánico llamadas tepetates (Flores *et al.*, 1991), las cuales pueden aflorar superficialmente, o bien, subyacer dentro del primer metro de profundidad del suelo (Sarabia *et al.*, 2002). Los tepetates tienen en común diversos niveles de cementación y/o compactación que van desde los medios hasta los extremadamente fuertes (Flores *et al.*, 2011), densidades aparentes altas ($1.7-1.9 \text{ Mg m}^{-3}$), porosidad baja (inferior al 24%), conductividades hidráulicas y retención de humedad bajas (Gama *et al.*, 2007), contenido de materia orgánica, nitrógeno y fósforo escaso (Flores *et al.*, 2011).

Las características anteriores impiden, o en el mejor de los casos, limitan el establecimiento de cobertura vegetal en los sitios donde el tepetate aflora o se encuentra a poca profundidad bajo el suelo, por lo tanto, estas áreas son improductivas desde el punto de vista agrícola (García *et al.*, 2008). Además, estos materiales son altamente susceptibles a erosionarse debido a que su baja permeabilidad propicia un escurrimiento superficial severo y un drenaje lateral excesivo cuando existe suelo sobre el tepetate (Gama *et al.*, 2007).

En la actualidad, las problemáticas ambientales en las áreas donde existen estas capas se ven incrementadas por la acción antropogénica como es: cambio de uso de suelo, tala inmoderada, quema de pastizales y sobre pastoreo (Gama *et al.*, 2007; García *et al.*, 2008).

Para poder usar un área donde el tepetate aflora, con fines agrícolas, será necesario llevar a cabo una habilitación, la cual consiste en modificar gradualmente las propiedades físicas y químicas del material para así mejorar su calidad productiva (Gama *et al.*, 2007; Flores *et al.*, 2011). Partes esenciales de esta habilitación son: La modificación de la estructura masiva, lo cual se consigue roturando mecánicamente al tepetate. Y la inducción de agregación e incorporación de materia orgánica, mediante el uso de enmiendas

orgánicas e inorgánicas, así como el establecimiento de cultivos resistentes (Flores *et al.*, 2004, Gama *et al.*, 2007; García *et al.*, 2007).

Las especies vegetales que pueden desarrollarse en los tepetates son aquellas poco demandantes en cuanto a nutrimentos y poco sensibles al déficit hídrico, es decir; plantas capaces de adaptarse a condiciones edáficas adversas. Sin embargo, dentro de este grupo de plantas, es preferible considerar para la habilitación de tepetates cultivos con valor económico importante y “una significativa capacidad de producción de compuestos de rizodeposición, de tal manera que puedan inferir en el balance nutrimental y la estructuración del tepetate”, (Izquierdo 2004).

El agave mezcalero (*Agave angustifolia* Haw), cumple con las características antes citadas, pues no sólo es un organismo rústico; adaptado a suelos someros, pobres en nutrimentos y agua, sino que existe una demanda creciente por este cultivo, dado que se utiliza para la elaboración de bebidas como mezcal y bacanora, extracción de fibras, obtención de inulina y como planta de ornato (Diodoro 1993; García Ab., 1998; García Ab., 2007).

Es importante mencionar que el presente proyecto forma parte de una línea de investigación que busca la habilitación de los tepetates para su incorporación al proceso productivo. Con anterioridad se realizaron trabajos similares en los que se evaluó la influencia de especies como: casuarina (*Casuarina equisetifolia* L, Velázquez *et al.*, 2001); eucalipto (*Eucalyptus globulus* L, Velázquez *et al.*, 2001); Pirul (*Schinus molle* L, Velázquez *et al.*, 2001); pasto Rhodes (*Cloris gayana* Kunth, Acevedo *et al.*, 2001; Velázquez *et al.*, 2001; Velázquez *et al.*, 2008); guaje (*Leucaena esculenta* Benth, Acevedo *et al.*, 2001); higuera (*Ficus carica* L, García *et al.*, 2008; Velázquez *et al.* 2008); sorgo (*Sorghun almun* Parodi, Velázquez *et al.*, 2001); guayaba (*Psidium guajava* L, Acevedo *et al.*, 2001); veza (*Vicia sativa* L, Velázquez *et al.*, 2001) y durazno (*Prunus persica* L, Flores *et al.*, 2011), en la formación de agregados para lograr la estructuración de tepetates roturados.

III. MARCO TEÓRICO

1. Tepetate

a) Definición, Distribución y Problemática

En México, el término “Tepetate” se utiliza para referirse a una serie de capas endurecidas de origen volcánico. Esta palabra deriva del Náhuatl *tepétlatl*, que literalmente significa “cama de piedra”, aunque quizá una acepción más adecuada y descriptiva sea “parecido a piedra” o “roca suave”, (Gama *et al* 2007). En el resto de América Latina se le conoce con nombres locales propios de cada país o región, así se tiene: “talpetate” en Centroamérica, “hardpán” en Colombia y Perú o “cangagua” en Ecuador y Chile (Zebrowski, 1992).

Los tepetates presentan diversos grados de compactación, que van de medio a fuerte y/o niveles de cementación que oscilan desde muy débil hasta extremadamente fuerte (Flores *et al.*, 1991, Flores *et al.*, 1996, Flores *et al.*, 2011). En general, la característica distintiva de estas capas es su estructura masiva y dureza, (Oleschko, *et al*, 2000). Al parecer los mecanismos y agentes que llevaron a tal endurecimiento son parte de procesos edáficos o diagenéticos que ocurrieron en ambientes del pasado y no son, necesariamente, producto de los procesos que ocurren en la actualidad (Gama *et al*, 2007, Díaz *et al*, 2010). No obstante, conviene señalar que hoy, en México, estas capas se encuentran preferentemente, mas no limitadas, en zonas con climas subhúmedos (precipitación anual <800 mm) caracterizados por una estación seca que dura de cuatro a seis meses y donde la tasa de evapotranspiración es mayor que la precipitación (Zebrowski 1992, Gama *et al*, 2007).

Se distribuyen principalmente en piedemontes de origen volcánico del cuaternario, a altitudes que van de los 1 800 a los 2 800 m. (Gama *et al*, 2007). En 1991 Flores *et al*, estimaron que el 30 % del territorio nacional está afectado por la presencia de tepetates (Figura 1). La estimación incluyó “a todas aquellas capas que presentaban diferentes grados de endurecimiento, entre ellas, capas compactadas, pero no cementadas (fragipanes); capas cementadas por SiO₂ (duripanes); por CaCO₃ (petrocálcico); por CaSO₄ (petrogípsico); por Fe₂O₃ (petroplintitas) y por diversas sales (petrosálico)”, (Gama *et al*, 2007). Por otra parte,

para Zebrowski (1992) los tepetates, específicamente los duripanes, cubren una superficie aproximada de 30 700 Km² del territorio nacional. Es preciso recalcar que en la actualidad el término “tepetate” sólo se aplica a las capas endurecidas de origen volcánico (duripanes y fragipanes).

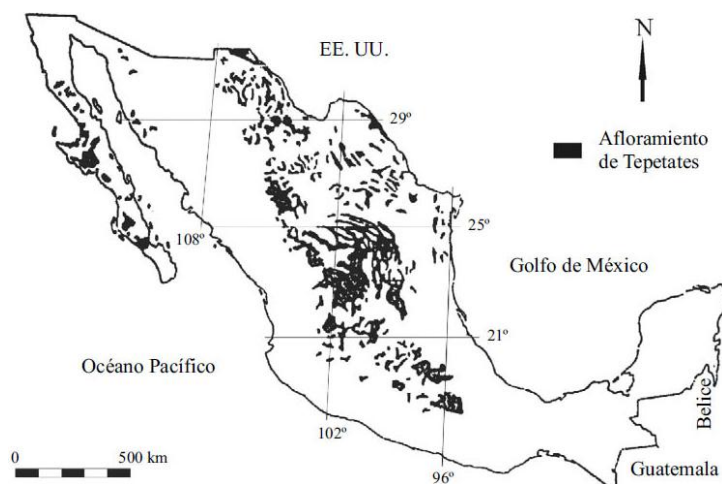


Figura1. Distribución de tepetates en la República Mexicana (Flores et al., 1991).

Los tepetates pueden encontrarse aflorando superficialmente, o bien, subyacer dentro del primer metro de profundidad del suelo (Sarabia *et al.*, 2002), con un espesor que va desde unos cuantos centímetros, hasta varios metros (Prat *et al.*, 2003). Estos afloran comúnmente en los estados de México, Tlaxcala y Puebla, así como Hidalgo, Querétaro y Morelos, (Prat *et al.*, 2003), es decir, se encuentran en varias de las entidades dentro del Eje Neovolcánico Transversal, la cual es un área donde se presenta la mayor densidad poblacional del país y por tanto, la presión sobre los recursos naturales como lo son las tierras de cultivo es muy alta. Así pues, en las parcelas donde la capa arable se erosiona y el tepetate queda expuesto, los campesinos abandonan el sitio por considerarlo improductivo y emigran a las ciudades (Velázquez *et al.*, 2001, Prat *et al.*, 2003, García *et al.*, 2008).

La pérdida del suelo sobre el tepetate puede llevarse a cabo de manera natural, o bien, resultar de un proceso inducido y/o acelerado por actividad antropogénica (Baez *et al.*, 2007). Además, los propios tepetates son materiales altamente susceptibles a erosionarse debido a que su baja permeabilidad propicia un escurrimiento superficial severo y un drenaje lateral excesivo cuando aún existe suelo sobre el tepetate, promoviendo así los deslizamientos (Gama *et al.*, 2007).

Las características de los tepetates son tales, que de manera común se sabe que en aquellas áreas donde se encuentran presentes, el suelo se encuentra impedido o limitado no sólo para desarrollar actividades productivas como la agricultura, si no también para prestar bienes o servicios dentro de la dinámica ambiental natural (Gama *et al* 2007).

b) Características

Las propiedades físicas y químicas de los Tepetates se conjuntan para hacerlos bastante restrictivos en cuanto al desarrollo de la vegetación, y para prestar servicios ambientales en general.

Características Físicas

Su color varía de gris a amarillo y pardo rojizo. Si bien los tepetates comparten un origen volcánico, tal variación en cuanto al color está relacionada con la composición mineralógica del material parental y al grado de alteración presente en estos (Acevedo 1998).

En general carecen de estructura, aunque también puede observarse estructura laminar y en bloques. Son capas que comúnmente se consideran “duras”, pues su resistencia a la compresión varía desde 3 hasta 160 kg/cm² (Acevedo 1998, Quantin *et al*, 1993). El valor intermedio para los tepetates tipo fragipan es <10 kg/cm², mientras que para los tipo duripan es alrededor de 25 kg/cm² (Flores *et al.*, 1991, Flores *et al.*, 1992, Flores *et al.*, 1996, Gama *et al.*, 2007), al parecer el contenido de humedad en el material influye de manera decisiva en las pruebas de resistencia. Las plantas encuentran difícil su establecimiento en estas condiciones, pues las raíces son incapaces de penetrar siquiera la superficie del tepetate.

La conductividad hidráulica de estas capas es bastante reducida, pues va de 5.4×10^{-4} hasta 130×10^{-4} cm/hora (Nimlos y Hillery, 1990), estos valores coinciden con su escaso contenido de poros, el cual está por debajo del 24 %, contabilizándose en los tepetates tipo duripan de 1 a 50 poros por dm², los cuales además son discontinuos y parcialmente cerrados debido a la presencia de cementantes (Acevedo 1998, Gama *et al.*, 2007). Así, la

permeabilidad del tepetate resulta prácticamente nula, característica que impide la recarga de los acuíferos, favorece el escurrimiento lateral y por tanto promueve los deslizamientos y la erosión. La estructura masiva y baja porosidad afectan directamente a la capacidad de aireación que resulta muy baja (Báez *et al.*, 2007, Gama *et al.*, 2007).

Poseen densidades aparentes altas ($1.45 - 1.9 \text{ g/cm}^3$), destacando que los tepetates tipo duripan muestran valores más elevados ($1.8 - 1.9$), con respecto a los tipo fragipan ($1.45 - 1.6$), (Flores *et al.*, 1996, Acevedo 1998, Gama *et al.*, 2007), sin embargo ambos comparten una capacidad de retención de humedad baja (Gama *et al.*, 2007, Flores *et al.*, 2011).

En cuanto a la textura, los datos son heterogéneos, variando de acuerdo al método utilizado para determinarla (pipeta o Bouyoucos), el tipo de material evaluado (tipo duripan o fragipan) y a la procedencia del mismo. De esta forma, los análisis en la fracción menor a 2mm reportan contenidos de arena de 30 a 60%, limos de 20 a 40% y arcillas de 25 a 54%. Para Flores (1996) y Acevedo (1998), los tepetates tipo duripan y fragipan poseen una textura predominantemente arenosa. La variación en cuanto a las texturas dificulta la habilitación de estos materiales, ya que cada clase textural muestra un comportamiento físico y mecánico diferente, por lo cual se requieren investigaciones específicas para cada una de ellas (Gama *et al.*, 2007).

Características Químicas

A diferencia de las propiedades físicas, los tepetates poseen tanto cualidades químicas convenientes para el desarrollo de la actividad biológica, como otras limitantes o poco favorables para el establecimiento de la cobertura vegetal.

Entre las favorables se tiene el pH, con valores que van del neutro al medianamente alcalino (6.8 a 8.5), tal variación en el pH puede tener su origen en las sales solubles que se disuelven al agregar agua destilada durante la determinación de este parámetro, (Etchevers *et al.*, 1992), estos valores coinciden con los niveles medio y alto de calcio y magnesio intercambiables (5 a 20 y de 4 a $13 \text{ Cmol}^+\text{kg}^{-1}$ respectivamente), reportadas por Flores y colaboradores, (1992, 1996 y 2011) y García y colaboradores (2008). De igual forma para

estos autores, el potasio se encuentra desde niveles medios a altos (0.3 a $2 \text{ Cmol}^+\text{kg}^{-1}$, Etchevers *et al.*, 1992). La capacidad de intercambio catiónico (CIC), se considera de media a alta pues va de 19 y hasta $40 \text{ Cmol}^+\text{kg}^{-1}$ (Etchevers *et al.*, 1992, Flores *et al.*, 1992, Flores *et al.*, 1996, Flores *et al.*, 2011).

De entre las cualidades poco favorables, se tiene una concentración de nitrógeno total (Tabla 1), y de fósforo disponible prácticamente inexistentes (Etchevers *et al.*, 1992, Baez *et al.*, 2007, Flores *et al.*, 2011). La falta de nitrógeno se explica por la ausencia casi absoluta de materia orgánica (tabla 1), que muy difícilmente alcanza valores máximos de 0.8 % (Flores *et al.* 1992, Flores *et al.* 1996, Gama *et al.*, 2007, García *et al.*, 2008 y Flores *et al.*, 2011), mientras que la escasez de fósforo es atribuida a que el material parental lo contiene en bajas cantidades (Etchevers *et al.*, 1992). Ya que el contenido de materia orgánica es tan bajo, y que las arcillas dominantes en los tepetates son haloisita y esmecticta, (Etchevers *et al.*, 1992), los valores más altos de CIC pueden estar definidos por la presencia de minerales amorfos, cuya formación resultaría de la alteración del vidrio volcánico o feldespatos (Etchevers *et al.*, 1992, Acevedo 1998).

Tabla 1. Concentraciones máximas y mínimas de MO, C, N y P reportadas para tepetate

	MO	C orgánico	N total	P total (P_2O_5)	P disponible mgKg^{-1}
	-----%-----				
Valores mínimos	0.02	0.07	0.01	0.03	Trazas
Valores máximos	0.8	0.36	0.07	0.28	0.05

Materia orgánica (MO); carbono (C); nitrógeno (N); fósforo (P). Tabla construida con información tomada de Etchevers *et al.*, 1992; Flores *et al.* 1996; Acevedo *et al.*, 2001; Gama *et al.*, 2007 y Flores *et al.*, 2011).

En cuanto al contenido de micronutrientes se sabe muy poco al respecto y sólo se ha reportado que los niveles de manganeso y zinc son muy bajos (Etchevers *et al.*, 1992). Por otro lado, la presencia de carbonatos es muy variable y va de 1.5 al 14% , aunque la media se ubicó alrededor de 1.6 al 4.6% (Etchevers *et al.*, 1992). Las altas concentraciones de carbonatos explicarían en parte la deficiencia de micronutrientes, así como la dureza de estos materiales, mientras que para aquellos tepetates con bajos contenidos de carbonatos, es posible que la dureza tenga su origen en un proceso de silicificación (Etchevers *et al.*, 1992).

Mineralogía

Para Quantin *et al.*, (1993), los tepetates están constituidos principalmente por piroclastos ricos en fenocristales y vidrios volcánicos inalterados, los fenocristales contienen plagioclasas sódicas (albita-andesina), feldespatos potásicos y sódicos, cuarzo, hornblenda, hiperstena, titano-magnetita y augita. Además para Etchevers *et al.*, (1992) y para Quantin *et al.*, (1992), las cenizas volcánicas que dan origen a los tepetates están parcialmente alteradas a arcillas y limo muy fino. Tanto Etchevers *et al.*, (1992), como Quantin *et al.*, (1993), coinciden en los minerales primarios contenidos en los tepetates.

En cuanto a la fracción fina, se encontraron diversas cantidades de haloisita y esmectita con grados de cristalización igualmente variables. También se observaron illita y montmorillonita interestratificadas y materiales amorfos, estos últimos compuestos principalmente de geles de sílice (Etchevers *et al.*, 1992). La presencia de sílice libre se atribuye a una alteración primaria de los vidrios volcánicos y a procesos pedológicos posteriores, que sin embargo, no explican en su totalidad la cementación de los tepetates (Etchevers *et al.*, 1992).

Micromorfología

Los estudios micromorfológicos permiten caracterizar los rasgos particulares de los materiales, rasgos directamente relacionados con su origen y en el caso de los tepetates, observar la distribución de los cementantes, aunque hasta la fecha es difícil determinar el origen de los cementantes debido a la complejidad de las formas químicas y morfológicas en las que pueden presentarse (Alfaro *et al.*, 1992).

Lo primero a resaltar cuando se observan al microscopio láminas delgadas de tepetates es, la estructura masiva, densa y casi continua, únicamente fragmentada por fisuras de contracción (Quantin *et al.*, 1992). Además, no se aprecia una distribución granulométrica, la falta de este tipo de arreglos es típica de una proyección de cenizas volcánicas (Quantin *et al.*, 1992). En cuanto a los rasgos pedológicos más comunes, se encuentran los revestimientos y los rellenos de arcilla, que se presentan hasta en el 90% de los casos estudiados y pueden llegar a comprender hasta el 20% de la superficie total de la

lámina (Oleschko *et al.*, 1992). Si bien en los tepetates el papel de la arcilla como cementante no es claro, si es evidente que está directamente relacionada con la disminución de la porosidad (Alfaro *et al.*, 1992).

c) Origen

Aunque se ha establecido que los tepetates se forman a partir de depósitos de cenizas volcánicas (Miehlich 1992, Quantin 1992, Zebrowski 1992), aún se sabe poco de los mecanismos que actúan sobre dichas cenizas, modificándolas hasta dar lugar a las capas endurecidas. El estudio de estos procesos se dificulta debido al gran número de formas de endurecimiento que se presentan y a la heterogeneidad de los materiales volcánicos que los originan (Dubroeuq 1992).

Hasta el momento se han podido identificar dos vías principales como probables explicaciones al origen de los tepetates: la geológica y la pedológica, las cuales pudieron actuar de manera independiente, o bien, en conjunto, sobre el material volcánico (Flores *et al.*, 1996).

Origen Geológico

Existen a su vez, dos procesos geológicos que podrían explicar el endurecimiento de los tepetates. El primero se refiere a la consolidación de los materiales volcánicos al momento mismo de su depósito. Los flujos piroclásticos sufren algún grado de endurecimiento como resultado de su temperatura de salida (700 a 900 °C), y subsecuente enfriamiento, alcanzando niveles de ligero a medianamente soldado, lo cual permitiría la acción posterior de procesos pedogenéticos (Zebrowski 1992, Macías *et al.*, 1995, Gama *et al.*, 2007). La consolidación hidromagmática, estaría estrechamente relacionada con la anterior, la diferencia radica en que esta última es consolidada por alteración hidrotermal a temperaturas que fluctúan entre 200 a 500 °C, donde los vidrios volcánicos se disuelven debido a la presencia de fluidos ácidos (HF, HCl, CO₂), y son cementados por productos de alteración como: sílice, arcilla y óxidos metálicos, dejándolos con una permeabilidad leve o nula (Acevedo 1998).

El segundo proceso geológico sugiere que la consolidación podría tener lugar por compactación simple o por hidroconsolidación, la cual consiste en la compactación de los materiales al sufrir un colapso estructural cuando es sometido a carga y humedad. Este fenómeno es favorecido cuando los materiales poseen cantidades de arcilla de alrededor de 30% (Zebrowski 1992, Sarabia *et al.*, 2002, Gama *et al.*, 2007). Para Nimlos (1989), el grado de consolidación es función directa tanto de la temperatura de los fluidos volcánicos, como de la compactación sufrida por ellos durante la depositación; de tal manera que, con un máximo de temperatura del fluido y bajo una compactación fuerte, los minerales silícicos se fusionan y forman tobas.

Origen Pedológico

Al parecer, algunas veces el origen del endurecimiento es el resultado de procesos pedogénicos como son; la argilización o la silificación, estos procesos promueven la compactación y/o cementación de las cenizas volcánicas depositadas *in situ* o retrabajadas (Gama *et al.*, 2007). Bajo este supuesto, los productos generados por el intemperismo de las cenizas volcánicas (principalmente amorfos: SiO_2 , Al_2O_3 y en menor grado arcillas), serían eluviados desde horizontes superiores para depositarse en los inferiores, provocando así la cementación de estos últimos (Gama *et al.*, 2007).

Para Nimlos y Hillery (1990), la formación de sílice amorfa (SiO_2), ocurre en el momento mismo del depósito del material volcánico, ya que en ocasiones las emisiones de ceniza vienen acompañadas de grandes cantidades de vapor de agua. Este vapor, al condensarse, precipita como lluvia saturando al depósito cinerítico. Una vez en condiciones de saturación, la ceniza se enfría tan rápido que no permite la cristalización de la sílice, dejando a esta como un material amorfo muy soluble que, posteriormente, al ser liberado a la solución del suelo, se moviliza y se sitúa en otras partes del perfil originando así la cementación de la masa entera de cenizas.

Cabe mencionar que, aunque la sílice libre está presente en la matriz y en la fracción arcillosa de la mayoría de los tepetates, esta no explica por si sola la cementación, pues en algunos tepetates la sílice se encuentra muy localizada o en cantidades muy bajas (Hidalgo *et al.*, 1992). De hecho, para Hessman (1992), el endurecimiento es causado principalmente

por arcillas de neoformación, las cuales se eluvian y rellenan los poros, formando revestimientos que al aumentar en número y espesor incrementan el endurecimiento del tepetate. De igual forma, la consolidación podría verse “reforzada” por la impregnación de compuestos de hierro, los cuales dan a los tepetates su coloración amarillenta, parda o rojiza. Al final, el endurecimiento del tepetate alcanzaría su punto máximo mediante el enriquecimiento de ácido silíceo y/o compuestos de hierro, dentro y encima de los revestimientos arcillosos.

Si bien, en los trabajos de Sarabia *et al.*, (2002) y Díaz *et al.*, (2010), donde se analizaron una serie de tepetates ubicados en el glacis de Buenavista, en el estado de Morelos, no se ofrecen explicaciones concretas con respecto a las causas que pudieron originar la consolidación de los tepetates. Se establece que estas capas son en realidad paleosuelos que se erosionaron de las partes altas del volcán y se redepusieron en forma de flujos laháricos, junto con el sedimento volcánico fresco, en las posiciones intermedias del glacis, durante un periodo de alta actividad volcánica. Lo anterior habría ocurrido dentro de un escenario de lluvia torrencial, seguido de un periodo prolongado de sequía que **no** permitió la alteración completa de los materiales recién depositados. Estos paleosuelos se habrían desarrollado en el Pleistoceno bajo un clima más húmedo y más frío al que prevalece en la actualidad. El alto contenido de arcilla en los tepetates quedaría explicado por los restos de los horizontes Bt de esos suelos antiguos y por las cenizas volcánicas dentro de ese intervalo de tamaño.

Degradación del Suelo

Adicionalmente, se considera que los tepetates pueden tener su origen en la degradación física del suelo, a su vez, los factores causantes de esta degradación pueden ser calificados como naturales o antrópicos (FAO-PNUMA, 1980).

Los naturales están constituidos por el factor climático y el edáfico. El primero se refiere principalmente a la abundancia y fuerza de las lluvias, mientras que el segundo comprende la alteración no antropogénica de las características diagnósticas del suelo (consolidación, compactación, cementación), (FAO-PNUMA, 1980; Gama *et al.*, 2007).

Dentro de los factores antrópicos se incluyen aquellos síntomas resultantes de las actividades humanas, como son: (1) deforestación debido a tala inmoderada, (2) sobreexplotación de la vegetación que deriva en la pérdida de la cubierta vegetal, (3) sobrepastoreo que genera la compactación del suelo y (4) actividades industriales y urbanizadoras (FAO-PNUMA, 1980; Gama *et al.*, 2007).

La degradación del suelo dispara una serie de procesos que comienzan con el deterioro de la estructura del horizonte superficial (horizonte A), que lo dejan susceptible a la erosión. Una vez erosionado el horizonte A, se da el afloramiento del horizonte subyacente, el cual, al quedar expuesto a las variaciones en su contenido de humedad por humedecimiento y secado repetidos se consolida y compacta (hidroconsolidación). Debido a esta compactación ocurre una disminución de la porosidad y un incremento en la densidad y dureza. Bajo estas circunstancias, el horizonte compactado podría ser cementado por la precipitación de diferentes lixiviados como la sílice libre (SiO_2), (FAO-PNUMA, 1980; Gama *et al.*, 2007).

Otras Capas Endurecidas

Otras capas endurecidas presentan diferentes formas de consolidación a las observadas en los tepetates, por ejemplo: Para los petrocálcicos, el principal cementante es el carbonato de calcio, el cuál precipita sobre la superficie de los peds, o bien, se acumula dentro de la matriz de los peds como partículas de tamaño arcilla. En los petrogípsicos la cementación se da por cristalización de sulfato de calcio cuando se alcanzan las condiciones óptimas de hidratación. En el caso de los sesquióxidos, se involucran diferentes clases de cementación promovidos por condiciones de óxido-reducción sobre el hierro distribuido en el perfil. En todos los casos anteriores, el desarrollo de la cementación se manifiesta por el incremento en la dureza y la densidad aparente (Flores *et al.*, 1991).

d) Habilitación

En general, el propósito de la habilitación del tepetate consiste en modificar este material, prácticamente estéril, para obtener un sustrato del cual pueda hacerse un aprovechamiento

sustentable, lo anterior, mediante el mejoramiento de sus características físicas, químicas y biológicas (Haulon *et al.*, 2007).

Antecedentes

El afloramiento de los tepetates es un fenómeno antiguo y extendido en los estados del centro de México, específicamente en las áreas comprendidas dentro del Eje Volcánico Transmexicano. Estos sitios han estado densamente poblados desde tiempos prehispánicos y desde entonces existe la necesidad de habilitar a los tepetates para incorporarlos a la producción agrícola (Báez *et al.*, 2007; Haulon *et al.*, 2007). De hecho, las culturas Nahuatl ya consideraban diversos tipos de capas endurecidas dentro de su sistema de clasificación de suelos (basados principalmente en el color y la textura de estas capas), y habían desarrollado algunas metodologías para su manejo (Williams B., 1992; Gama *et al.*, 2007; Haulon *et al.*, 2007).

En el México precolombino, algunas prácticas indígenas para llevar a cabo el laboreo y la fertilización de los tepetates consistían en: (1) el relleno de los mismos con suelo fértil. (2) la preparación del terreno por medio de la ruptura de la costra superficial con herramientas manuales, seguida de la pulverización de los terrones resultantes y (3) finalmente, se procedía a la fertilización del tepetate mezclándolo con cenizas obtenidas de la quema de hojas de maguey (Arias 1992). Gama *et al.* (2007), mencionan también el cultivo de especies resistentes como un paso anterior a la incorporación del terreno a la producción agrícola. Además, se realizaba el terraceo de aquellas parcelas tepetatosas ubicadas en ladera, con el fin de propiciar la retención del agua. Los bordos resultantes durante la excavación de las zanjas evitaban la erosión hídrica, conteniendo las partículas arrastradas por la lluvia desde las terrazas superiores (Pimentel 1992). Estas técnicas aún se emplean actualmente pero con la inclusión de maquinaria pesada (Arias 1992).

En épocas más recientes, Hernández (1987), señala que en México; “el grupo étnico que mejor conocía las características de los tepetates, era el de los Tlaxcaltecas, quienes desde hace más de cien años lo usan con fines agrícolas, fracturándolos y agregándoles estiércol, además de hacer obras (canales), para el manejo y conducción del agua de riego”. Báez *et al.*, (2007), agregan que al final del siglo XIX, los agricultores locales en Tlaxcala

comenzaron a romper pequeñas parcelas de tepetate utilizando picos y palas, posteriormente, a mediados del siglo XX se introdujo maquinaria pesada para realizar las labores aunque a pequeña escala. La penetración de modernos subsoladores (de hasta 1.2m de profundidad), en el tepetate, contribuye a mejorar la permeabilidad de estos materiales y facilita el desarrollo radical de las plantas (Pimentel 1992).

A partir de la década de los sesenta comienza el estudio sistematizado de los tepetates en lo referente a: su cartografía (Aguilera 1969, Williams 1972, Nimlos 1989, Flores *et al.*, 1991), su morfología y caracterización física y química (Valdez 1970, Flach *et al.*, 1992, Hidalgo *et al.*, 1992, Flores *et al.*, 1992, Miehllich 1992, Peña y Zebrowski 1992, Flores *et al.*, 1996), su origen (Campos 1992, Dubroeuq 1992), su dinámica en la erosión y degradación del suelo (Arias *et al.*, 1992, Pratt *et al.*, 1992, Sarabia *et al.*, 2002, Haulon *et al.*, 2007, Díaz *et al.*, 2010), su incorporación al proceso productivo (Arias, 1992, Nava *et al.*, 1992, Etchevers *et al.*, 1997, Acevedo 1997, Flores *et al.*, 2004, García *et al.*, 2007, García *et al.*, 2008, Flores *et al.*, 2011) e incluso como herramienta para reconstrucciones paleoambientales (Sarabia *et al.*, 2002). Así, en la actualidad ya no sólo se trata de intentar usar al tepetate como un sustrato para la agricultura, si no de establecer, comprender y ordenar, los procesos necesarios a los que hay que someterlo para modificar las características que lo limitan para ofrecer servicios ambientales, o impiden utilizarlo con fines agropecuarios, así como esclarecer las dinámicas ambientales del presente o del pasado, que llevaron a su formación y que le confieren sus propiedades particulares.

Consideraciones para la Habilitación

Se ha establecido que la habilitación del tepetate combina básicamente dos acciones:

1) Fragmentación o Roturación.-

Como se ha señalado, una de las principales limitantes de los tepetates es su estructura masiva y dureza, lo primero que hay que considerar al inicio de una habilitación con fines agrícolas o forestales, es la fragmentación o roturación (Gama *et al.*, 2007). La cuál consiste en romper y aflojar la parte superior del tepetate mediante el uso de herramientas manuales o maquinaria pesada. Esta acción modifica rápidamente las propiedades físicas del tepetate, mejorando las condiciones de circulación y almacenamiento de agua, y permite el establecimiento y desarrollo de las raíces.

Según Werner (1992), el tepetate recién roturado con maquinaria pesada, muestra numerosos poros grandes ($> 120\mu\text{m}$), y grietas, pero una cantidad limitada de poros pequeños y medios (0.2 a $10\mu\text{m}$), que son los responsables del almacenamiento del agua. No obstante, esta condición puede corregirse recompactando mecánicamente el sustrato, de tal manera que los poros grandes se ven reducidos en tamaño hasta obtener una porosidad total aproximada de 50% distribuida en: 20% de poros grandes, 20% poros medios y 10% de poros finos. Aún con estas alteraciones, la fertilidad del tepetate aún se encuentra reducida, debido principalmente a la ausencia de carbón y nitrógeno (Haulon *et al.*, 2007).

Prácticas de uso

Aunque las consecuencias de la fragmentación sobre las características físicas del tepetate son instantáneas, son las prácticas de uso a las que se somete el material, después de dicha fragmentación, las que determinan realmente la evolución en cuanto a su erosión, escurrimiento superficial y fertilidad. Así, bajo prácticas de uso adecuadas, el mejoramiento de las propiedades físicas asegura el decrecimiento de la erosión y el escurrimiento superficial, lo cual, a su vez, garantiza el mejoramiento de sus rasgos químicos y la actividad biológica, que conllevan, finalmente, a un incremento en la fertilidad (Haulon *et al.*, 2007).

Por otro lado, si las prácticas de uso son inapropiadas, o si la parcela fragmentada es abandonada, los beneficios de la roturación decrecen rápidamente y la superficie vuelve a sellarse y compactarse, permitiendo, de nueva cuenta, el escurrimiento superficial y la erosión (Haulon *et al.*, 2007).

Conocer los efectos de las prácticas de cultivo sobre la hidrodinámica de los tepetates, es un factor clave para una habilitación exitosa, ya que esta determina el abastecimiento de agua para los cultivos, y la conservación del potencial de producción recién desarrollado (Haulon *et al.*, 2007). El uso de enmiendas orgánicas también ha sido recomendado repetidamente para la habilitación de estas capas (Arias 1992, Pimentel 1992, Báez *et al.*, 2007, García *et al.*, 2007, Flores *et al.*, 2011), con el propósito de incrementar el nitrógeno y el fósforo disponibles, así como el contenido de materia orgánica (Etchevers *et*

al., 2004), aunque su efecto directo sobre la erodabilidad en condiciones de campo aún se desconoce (Haulon *et al.*, 2007).

Mientras las condiciones de fertilidad mejoran, los problemas nutrimentales en las plantas, ocasionados por las deficiencias de los elementos C, N y P, de los cuales carecen los tepetates, o los contienen en cantidades muy bajas, pueden ser compensados con el uso de abonos orgánicos y/o fertilizantes químicos (Báez *et al.*, 2007). Si bien, el tepetate es muy pobre en los elementos antes mencionados (tabla 1), su contenido de nutrimentos, así como su capacidad de intercambio catiónico (tabla 2), es similar a lo encontrado en suelos productivos (Etchevers *et al.*, 2004). Por lo tanto, la prioridad en cuanto a la habilitación con fines agrícolas, debe ser la alteración de sus propiedades Físicas.

Tabla 2. CIC y concentraciones máximas y mínimas de BI reportadas para tepetate

	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
	-----Cmol ⁺ Kg ⁻¹ -----				
Valores mínimos	19	5	4	0.4	0.3
Valores máximos	40	20	13	3.4	2

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC); Bases Intercambiables (BI); calcio (Ca²⁺); magnesio (Mg²⁺); sodio (Na⁺) y potasio (k⁺). Tabla construida con información tomada de Etchevers *et al.*, 1992; Flores *et al.* 1996; Acevedo *et al.*, 2001; Gama *et al.*, 2007; García *et al.*, 2008 y Flores *et al.*, 2011).

Propuestas de Habilidadación

En 2004, Etchevers *et al.*, proponen la siguiente serie de acciones para la habilitación de un tepetate tipo fragipan:

- 1) La capa de tepetate debe romperse manual o mecánicamente, a una profundidad mínima de 40 cm, el tamaño de los fragmentos debe ubicarse entre 3 y 5mm, evitándose la fragmentación fina (menor a 2mm), así como la labranza frecuente del tepetate.
- 2) Después de la labranza debe añadirse materia orgánica (una aplicación de 40 Mg ha⁻¹ de estiércol de granja, tiene un efecto residual de hasta 4 años).

- 3) La aplicación de fertilizantes nitrogenados y fosfatados es necesaria para complementar la adición de materia orgánica; las cantidades se aplican con base a la demanda del cultivo y a la capacidad de suministro de nutrimentos del tepetate recuperado. Se recomienda que la aplicación de nitrógeno se realice de manera fraccionada para mejorar su uso y eficiencia.
- 4) En la fase inicial de establecimiento del cultivo, es aconsejable aumentar hasta en 50 % la densidad de siembra, con el fin de obtener una mejor población de plantas.
- 5) Los cultivos que han mostrada mejores respuestas en los primeros cinco años de la incorporación del tepetate son los cereales de grano pequeño, como: avena, trigo y cebada, así como cultivos forrajeros como: vicia y trébol. Sólo se han obtenido buenas repuestas hasta el segundo o tercer año de cultivo para maíz, frijol y haba, principalmente cuando se plantan en asociación. Al respecto, Flores-Román (comunicación personal, 2011), sugiere que antes del establecimiento de cultivos altamente demandantes en nutrimentos, como el maíz, debe procurarse la siembra de frutales como; higuera (*Ficus carica*), guayaba (*Psidium guajava*) y durazno (*Prunus persica*), durante los primeros años de habilitación del tepetate. Esto, debido a que estas especies vegetales fomentan la estructuración del material recién roturado, y sus demandas nutrimentales pueden cubrirse fácilmente con fertilizantes químicos.
- 6) Se recomienda la implementación de la rotación de cultivos que contemple leguminosas y gramíneas.

En experimentos anteriores Werner (1992), obtuvo rendimientos muy bajos de maíz, frijol (*Phaseolus vulgaris*) y haba (*Vicia faba*), cultivados en tepetate recién roturado, en cambio, coincide con Flores-Román al sugerir el establecimiento de especies pioneras como el ayocote (*Phaseolus coccineus*), antes de la siembra de cultivos tan demandantes.

En el aspecto forestal se ha encontrado que especies como *Pinus radiata* y *P. montezumae* crecen muy bien en tepetates gris y rojo en área del Lago de Texcoco. Mientras, en Tlaxcala, se reporta que al probar con varias especies de pino, en cepas de 50 x 50 x 50cm, se encontró que los que mejor sobrevivieron luego de 12 años fueron: *Pinus teocote*, *P. pseudostrobus* y *P. brutia* (hasta 91.6% de sobrevivencia), siendo los dos primeros los que alcanzaron mayor altura y cobertura. Otras especies forestales con buena sobrevivencia son: *Cupresus Lindley*, *Fraxinus americana* y *Acacia retinoides* (Arias 1992).

Marco Histórico

Lejos de cuantificar únicamente la producción de biomasa de los cultivos, es necesario llevar a cabo el monitoreo de las propiedades físicas, químicas, mineralógicas y biológicas del tepetate roturado, con el fin de determinar y caracterizar los procesos que actúan sobre él y que llevan al mejoramiento de sus potenciales agrícolas y forestales. En ese sentido, se han realizado varios experimentos donde se introducen y prueban variables como: uso de enmiendas orgánicas e inorgánicas (Prat *et al.*, 2003, Díaz *et al.*, 2004, Baéz *et al.*, 2007), diversas cantidades de abonos y fertilizantes químicos (Flores *et al.*, 2004), presencia de micorrizas (Campos *et al.*, 2004, García *et al.*, 2008), así como especies vegetales múltiples (Velázquez *et al.*, 2001, García *et al.*, 2007, Velázquez *et al.*, 2008, Flores *et al.*, 2011). Todo esto con el fin de establecer las combinaciones de enmienda y especies vegetales que ofrezcan una mejor respuesta, es decir, establecer aquellas prácticas que sean capaces de inducir cambios más notorios en el material en el menor tiempo y con el mayor beneficio ambiental y económico posibles.

Dentro de la línea de investigación a la cual pertenece este trabajo, se han realizado estudios similares en los que se evaluó la influencia de las especies: casuarina (*Casuarina equisetifolia* L), eucalipto (*Eucalyptus globulus* L), Pirul (*Schinus molle* L), pasto Rhodes (*Cloris gayana* Kunth), higuera (*Ficus carica* L), sorgo (*Sorghun almun* Parodi), cempasuchil (*Tagetes erecta* L), clavel (*Dianthus caryophyllus* L), guayaba (*Psidium guajava* L), veza (*Vicia sativa* L) y durazno (*Prunus persica* L); así como enmiendas: estiércol, composta, vermicomposta y fertilizantes químicos; e incluso micorrizas, en la evolución de las propiedades físicas, químicas y la fertilidad en general, de tepetates roturados para su integración al proceso productivo.

Hasta el momento, todas las especies vegetales promovieron un incremento en el porcentaje de materia orgánica, favorecieron la estructuración y se observó que el efecto combinado tanto de especies vegetales como de abonos orgánicos beneficiaron la estabilidad de los agregados, (Acevedo *et al*, 2001; Velázquez *et al*, 2001; Plancarte 2006; Flores *et al.*, 2011).

Para el propósito de habilitación, son especialmente efectivas las especies que poseen una raíz vigorosa, que pueda ejercer un efecto físico al penetrar a profundidad y envolver los fragmentos de tepetate (García *et al.*, 2007), y que cuenten, al mismo tiempo, con “una significativa capacidad de producir compuestos de rizodeposición, de tal manera que puedan influir en el balance nutrimental y la estructuración del tepetate”, (Izquierdo 2004).

Si bien es cierto que cualquier planta adaptada a condiciones edáficas adversas, como son: baja disponibilidad de nutrimentos y déficit hídrico, podría desarrollarse en el ambiente que ofrece un tepetate recién roturado, es preferible considerar para la habilitación de estas capas, únicamente aquellos cultivos que contemplen un valor económico y/o ambiental importante, que pueda redituar en el menor tiempo posible el esfuerzo invertido, ya sea de manera financiera o en forma de servicios ambientales.

2. Especie Vegetal

a) Generalidades

Para este trabajo se consideró utilizar a la especie vegetal *Agave angustifolia* Haw, como un factor de alteración biológica sobre el tepetate roturado.

A esta planta se le llama coloquialmente “maguey espadín” o “maguey mezcalero” (García 1998, Bautista *et al.*, 2007), su zona de distribución comprende a partir del estado de Sonora en México, hasta Panamá, puede desarrollarse en varios entornos, desde las dunas costeras a nivel del mar, a los bosques de pino-encino a 2200 m.

Sus hojas o pencas son numerosas y alcanzan hasta 120 cm de largo por 3.5 a 10 cm de ancho. Están dispuestas en espiral formando una roseta extendida en forma radial. Son de color grisáceo o verde pálido, lineares o lanceoladas, fibrosas, jugosas, de inclinación ascendente a horizontal, planas o cóncavas de arriba, convexas de abajo. Poseen dientes pequeños de 2 a 5 mm de longitud, de puntas débiles curvadas, espaciadas a intervalos regulares. La hoja termina en una espina marrón, cónica y distal.

Al cabo de seis a ocho años, la planta completa alcanza hasta 180cm de altura, es suculenta; tallo de 20 a 90 cm de longitud. Inflorescencia de 3 a 5 m de alto, densamente ramificada, bulbífera; flores verdes a amarillas de 50 a 65 mm de longitud (Iñiguez *et al.*, 2001, García y Chiang 2003, Peña *et al.*, 2004, Agroproduce 2007).

Agave angustifolia Haw pertenece a un género conformado por 247 taxas, de los cuales 186 se encuentran ampliamente distribuidos en la República Mexicana (Moreno *et al.*, 2007). Varias de estas especies poseen importancia biológica, cultural y económica porque constituyen una fuente renovable de alimento (74 especies), azúcares, almíbar, fibras, celulosa, forraje, productos farmacéuticos, bebidas (en 26 estados de México) y plantas ornamentales (Amaury *et al.*, 2011, Martin *et al.*, 2011).

Usos e Importancia

Entre esas especies, *Agave angustifolia* Haw destaca por el uso tan variado que se le puede dar a todas las partes de la planta: alimento (capullos, flores, tallos, bases de las hojas, pedúnculos florales jóvenes y frutos); construcción (el tallo de la inflorescencia se utiliza como postes, vigas y cercas, las hojas para techar); forraje (hojas); combustible (plantas secas); fibras para hacer cuerdas; bebidas (los tallos se cocinan y se extrae el jugo que posteriormente se fermenta y destila en bebidas alcohólicas); medicinas tradicionales (jugo de las hojas, tallos cocidos y una infusión raíz se toman internamente o se utilizan como cataplasmas para la inflamación tanto interna como externa, así como para enfermedades renales y del hígado, la artritis y la disentería); elaboración de diversos utensilios (espinas utilizadas como clavos o agujas); o bien, con fines ornamentales (planta entera). Las más importantes de estas aplicaciones son: el uso como una fuente de fibras duras, alimentación y para la fabricación de bebidas alcohólicas destiladas (García y Chiang 2003).

La producción de bebidas alcohólicas destiladas de agave data del siglo XVII. Estas bebidas tienen nombres diferentes que dependen de la zona de producción, los más populares son el tequila y el mezcal. El mezcal se produce utilizando como materia prima a los agaves: *Agave cupreata*, *A. salmiana*, y *A. potatorum*, pero principalmente al *A. angustifolia* (Martínez y Peña 2009, Chávez e Hinojosa 2010).

Actualmente, a nivel experimental, se busca obtener bio-combustibles a partir de la fermentación del bagazo. Éste bagazo está compuesto por las fibras trituradas del tallo y resulta como subproducto de la elaboración de bebidas alcohólicas. Por esta vía se puede producir: metanol, etanol, n-propanol, 2-butanol y ácido acético. Estos combustibles tendrían la ventaja de no ser producidos a partir de cultivos alimenticios como el maíz o la soja (Chávez e Hinojosa 2010; Chávez *et al.*, 2012).

En principio, podría producirse hasta 80 litros de bio-combustible por tonelada de bagazo. Considerando que en 2008 se procesaron 9 millones de toneladas de agave para la industria tequilera, sería posible obtener alrededor de 187 millones de litros de bio-combustible al año, pues el bagazo constituye cerca del 40% del peso total del tallo (Nuñez *et al.*, 2011).

Otros agaves, estrechamente emparentados con el maguey espadín, se utilizan en la fabricación de automoviles, donde sus fibras, por su dureza, pueden sustituir al plástico y la fibra de vidrio, tal es el caso del “sisal”, (*Agave sisalana*), además, las fibras de este y otros agaves se encuentran bajo investigación con el fin de desarrollar métodos de biosorción de metales pesados como Pb y Cd (dos Santos *et al.*, 2011). Las fibras también tienen potencial para desarrollar papel, artesanías, geotextiles, filtros, empaques y materiales compuestos (Iñiguez *et al.*, 2001).

La importancia económica del *Agave angustifolia* Haw es tal, que en Sonora la producción del mezcal conocido como bacanora proporciona el tercer mayor ingreso obtenido a partir de un recurso natural y, para algunos hogares, representa su único medio de subsistencia (Martin *et al.*, 2011). Por desgracia, este auge también ha llevado a que en regiones, como Oaxaca, la vegetación original de los bosques secos, tropicales y otros hábitats, sea talado y quemado a un ritmo creciente para establecer cultivos de esta planta. La conversión de bosques en agroecosistemas lleva a la degradación del suelo debido a la disminución de aportes de materia orgánica (Bautista *et al.*, 2007, Martin *et al.*, 2011).

Prácticas de Cultivo

La mayoría de las veces la productividad del agave se encuentra limitada por la baja disponibilidad de nitrógeno, fósforo, potasio y boro en el suelo (Gobeille *et al.*, 2006). Se ha observado que esta productividad aumenta en cortos períodos de tiempo, en respuesta a la aplicación de fertilizantes inorgánicos. Sin embargo, a menudo la fertilización no se realiza debido al costo involucrado. De hecho, en el estado de Oaxaca, sólo el 52 % de los 13,231 productores de maguey espadín, reportaron haber usado algún tipo de fertilizante en sus plantaciones. Otra práctica común es permitir pastar al ganado en los campos de agave para controlar las malas hierbas y depositar el estiércol (Gobeille *et al.*, 2006, Bautista *et al.*, 2007).

Las Agavaceas en general, son organismos muy resistentes, que gracias a su particular sistema de raíces, morfología suculenta y un metabolismo adaptado a ambientes áridos, pueden desarrollarse sin problema en suelos poco profundos, pobres en

nutrimentos y con déficit hídrico, por lo tanto, para el cultivo de estas especies existe una reducida o nula necesidad de riego, lo que permite su explotación en zonas con condiciones edáficas adversas (Gobeille *et al.*, 2006, Bautista *et al.*, 2007, Chávez e Hinojosa 2010). Debido a que la cosecha, asociada a la agricultura comercial de esta planta, ocurre aproximadamente cada 6 a 10 años, el cultivo de agaves no involucra una rápida disminución de los niveles de nutrientes del suelo (Gobeille *et al.*, 2006).

b) Agave como Variable Experimental

El valor comercial de *Agave angustifolia* Haw, y su adaptación natural a ambientes difíciles, así como su importancia cultural y ambiental en nuestro país, hacen de esta planta un sujeto de prueba interesante como factor de alteración biológica sobre el tepetate, para intentar mejorar las propiedades físicas, químicas y de fertilidad en general, de este sustrato. Como se mencionó antes, el mejoramiento del potencial agrícola del tepetate permitiría, paulatinamente, el sustento de otros cultivos más demandantes y de ciclo más corto como el maíz, o algunas leguminosas. Así, el agave espadín actuaría como pionero, facilitando el posterior establecimiento de otras especies con valor forestal o agrícola en zonas tepetatosas actualmente improductivas o degradadas. Además, debido a la estrecha relación filogenética del *Agave angustifolia* Haw con otros agaves de alta importancia económica como: el agave azul (*A. tequilana*), lechuguilla (*A. vivipara*), el sisal (*A. sisalana*) y el henequén (*A. furcroydes*), los resultados obtenidos en el presente estudio podrían extrapolarse para todas estas especies.

La habilitación de tepetates evitaría la destrucción de áreas forestales con el fin de establecer cultivos. Así mismo, las zonas con tepetates habilitados adquirirían nuevos potenciales para prestar servicios ambientales.

3. Intemperismo

a) Tipos e Implicaciones

A la alteración de las propiedades (físicas, químicas y mineralógicas), de materiales geológicos por efecto de procesos o factores ambientales se le llama intemperismo (Bih *et al.*, 2012) Dependiendo del tipo de factor tenemos distintos tipos de intemperismo: 1) Intemperismo Físico, resulta del rompimiento mecánico del material, donde los sitios de ruptura dejan expuestos a los minerales primarios, quedando susceptibles a la acción del intemperismo químico. 2) El Intemperismo Químico, induce cambios mineralógicos, texturales y geoquímicos del material a través de la disolución, lixiviación, precipitación, enriquecimiento y/o formación de minerales secundarios (Bih *et al.*, 2012). 3) El Intemperismo Biológico se refiere a las alteraciones físicas o químicas sufridas por el material parental a través de la actividad de los organismos que habitan el suelo (Finlay *et al.*, 2009).

El intemperismo determina la formación del suelo, el suministro de nutrimentos disponibles para las plantas y la capacidad del suelo para amortiguar la acidificación. La tasa de intemperismo en el suelo está definida por la textura (tamaño de partícula), mineralogía del material parental, vegetación, depositación atmosférica, clima, destino de los productos de la intemperización, erosión y las reacciones químicas que ocurren en el suelo (Finlay *et al.*, 2009, Schaller *et al.*, 2009, Palviainen *et al.*, 2012). El contacto de los minerales primarios con los elementos de la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera, da lugar a cambios irreversibles, hacia un estado más fragmentado y/o plástico, que involucra un incremento en el volumen, decrecimiento en la densidad y tamaño de partícula y en la producción de nuevos minerales más estables bajo las condiciones ambientales dominantes (Hall *et al.*, 2012).

b) Repercusiones Ambientales

El balance de nutrimentos en el suelo y la productividad de los ecosistemas forestales, dependen en gran medida del intemperismo, pues éste determina el abastecimiento de los cationes disponibles para las plantas (Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+), y para el sistema de intercambio del

suelo. De este modo, al remover nutrientes (por medio de la tala de árboles o la cosecha de cultivos agrícolas), se promueve un decrecimiento en la fertilidad del suelo, a menos que la salida de nutrientes se vea compensada a través de la depositación atmosférica, o bien, por medio del intemperismo de los minerales (Palviainen *et al.*, 2012). Así, el manejo sustentable de bosques requiere que la cantidad de nutrientes perdidos en la biomasa cosechada no exceda la tasa de reposición natural (Palviainen *et al.*, 2012). En palabras de Finlay *et al.*, (2009); “el intemperismo es una fuente de nuevos nutrientes, necesarios cuando la circulación de nutrientes disponibles ya no es suficiente para mantener la fertilidad y la producción de un ecosistema”.

c) Influencia de los Organismos Vivos en el Intemperismo

En el caso particular del intemperismo biológico, se considera que los factores bióticos pueden inducir de manera directa o indirecta la meteorización, los microorganismos contribuyen a la disgregación, hidratación y disolución de los minerales, así como a la formación de minerales secundarios. Mientras tanto, las plantas toman cationes del suelo y liberan protones, lo cual fomenta la formación de micro ambientes con pH bajos donde el potencial redox cambia y la disolución mineral se incrementa.

La descomposición de la biomasa de los organismos en general libera CO₂, cationes básicos y ligandos orgánicos que catalizan el intemperismo por medio de la unión de iones en la superficie del mineral, o por formación de complejos con los iones en solución (Finlay *et al.*, 2009, Bakhshandeh *et al.*, 2011). Además, las aportaciones de carbono derivadas de procesos fotosintéticos influyen sobre el intemperismo, pues la producción de exudados de las raíces incrementa el tiempo de retención de agua en la superficie de los minerales, incrementa la difusión de iones fuera de la superficie mineral y junto con las superficies celulares, actúan como sitios de nucleación para la producción de minerales secundarios (Finlay *et al.*, 2009). La rizosfera se convierte así, en un ambiente donde ocurren profundos cambios químicos, incluso, se sugiere que el suelo puede ser considerado, en parte, como un producto de las plantas y la biota del suelo (Bakhshandeh *et al.*, 2011).

IV. OBJETIVOS

1. Generales

- Caracterizar e interpretar los cambios provocados por el cultivo de agave (*Agave angustifolia* Haw), así como por la adición de estiércol bovino y fertilizante inorgánico, en algunas propiedades físicas y químicas del tepetate fragmentado, mediante estudios en invernadero.
- Evaluar en invernadero, el crecimiento del agave cultivado en el tepetate fragmentado con y sin la adición de enmiendas.

2. Particulares

Mediante estudios desarrollados en invernadero se planteó:

- Determinar si los cambios en los parámetros físicos (densidad aparente, conductividad hidráulica, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, retención de agua disponible, clases de tamaño de partícula, estabilidad de tamaño de partículas) y químicos (pH, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, bases intercambiables e índices de intemperismo), sufridos por el tepetate bajo las condiciones experimentales, son favorables para su gradual habilitación.
- Comparar el efecto de distintas dosis de fertilización en el crecimiento, características morfológicas y contenido de azúcares reductores totales de *Agave angustifolia* Haw cultivado en tepetate fragmentado.

V. HIPÓTESIS

- Los factores empleados en este trabajo: el cultivo de agave, la adición de estiércol bovino y el uso de fertilizante inorgánico, favorecerán el intemperismo del tepetate. Al intemperizarse, los cambios físicos y químicos ocurridos en el tepetate, repercutirán en la fertilidad natural de éste sustrato, aumentándola.

- Se obtendrá mayor producción de biomasa, y agaves de mejor calidad (*Agave angustifolia* Haw), en los tratamientos que incluyan adición de enmiendas.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Sitio de Muestreo

El Tepetate utilizado en este trabajo se recolectó en el noreste del estado de Morelos ($18^{\circ} 52' 30''$ N y los $98^{\circ} 57' 30''$ O), a una altitud de 1400 a 1700 m (figura 1) dentro del municipio de Tetela del Volcán.

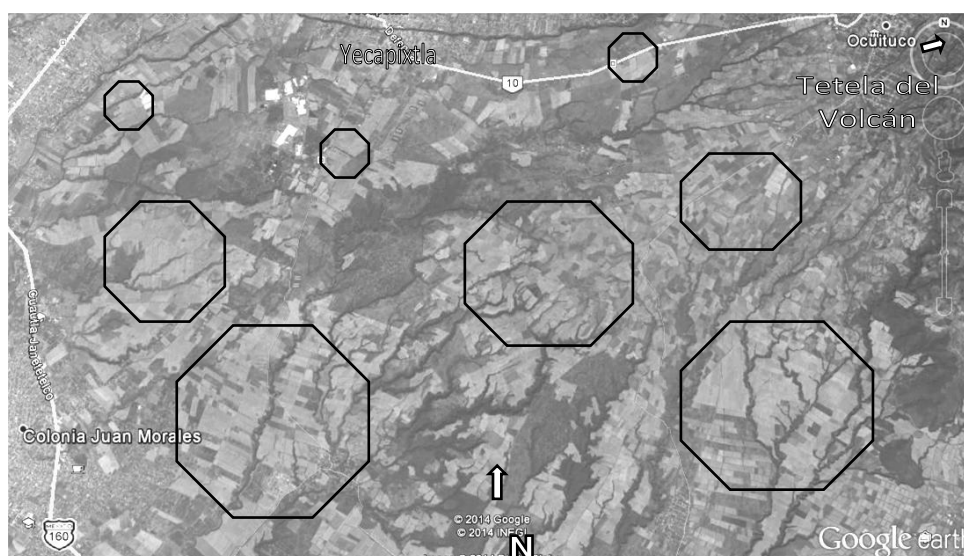


Figura2. Vista aérea de la zona donde se recolectó el material geológico. Las áreas en tono claro (enmarcadas por polígonos), muestran superficies donde el tepetate aflora o se encuentra a poca profundidad debajo del suelo. Escala 1:5000.

Este municipio cuenta con un clima Cb (m) (w) ig, templado húmedo, el más húmedo de los templados con lluvias en verano (García, 1988), una precipitación de 1200 mm y una temperatura media anual de 20° C (Marañón, 1994 in Izquierdo 2004). Predominan las rocas ígneas extrusivas (brechas y basaltos) del cuaternario. La vegetación dominante la constituye bosque de coníferas, y comunidades de pino-encino. (INEGI, 2011). Los suelos presentes corresponden a Luvisoles, Andosoles y Leptosoles (Marañón, 1994 in Izquierdo 2004), el uso de los mismos corresponde a pastizal con pastoreo intensivo y agricultura de temporal (Flores *et al*, 1992). En este sitio “las condiciones ambientales, la geoforma de lomeríos y cañadas de pendiente medias a fuertes, han incrementado la susceptibilidad de los suelos a la erosión, permitiendo el afloramiento del tepetate” (Velázquez, 1997).

2. Diseño Experimental

Para este experimento se consideraron tres factores:

1. Planta: con agave y sin agave (dos niveles).
2. Estiércol: con estiércol y sin estiércol (dos niveles).
3. Fertilizante químico: sin fertilizante químico y fertilizante químico en concentraciones alta (A) y baja (B), (tres niveles).

De lo anterior se desprende un diseño experimental trifactorial 2 x 2 x 3 que da como resultado: 12 tratamientos (tabla 3), con cuatro repeticiones por tratamiento, que en su conjunto suman un total de cuarenta y ocho unidades experimentales con distribución completamente al azar.

Tabla 3. Tratamientos establecidos

Tratamiento	Planta	Materia		Clave
		Orgánica	Fertilizante Químico	
0	sin	sin	sin	T0 ²
1	sin	sin	sin	TAB
2	sin	sin	B ¹	TDB
3	sin	sin	A	TDA
4	sin	estiércol	sin	TE
5	sin	estiércol	B	TEDB
6	sin	estiércol	A	TEDA
7	agave	sin	sin	P
8	agave	sin	B	PDB
9	agave	sin	A	PDA
10	agave	estiércol	sin	PE
11	agave	estiércol	B	PEDB
12	agave	estiércol	A	PEDA

¹B: dosis baja; A: dosis alta. ²T0: Material original, roturado y tamizado, pero sin enmiendas, planta, ni riego; TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

Las unidades experimentales estuvieron integradas por macetas sin perforaciones para evitar pérdidas, con aproximadamente cinco Kg de tepetate fragmentado y tamizado para obtener únicamente las fracciones comprendidas entre el intervalo: 2 – 10mm. Las

plantas fueron de la familia Agavaceae, de la especie *Agave angustifolia* Haw de tres meses de edad, donadas por una empresa dedicada a la producción de mezcal. El estiércol fue de origen bovino, mientras que los fertilizantes químicos consistieron en: sulfato de amonio con 20.5% de Nitrógeno; superfosfato de calcio simple, con 19.5% de P_2O_5 ; y cloruro de potasio; con 60% de K_2O ; todos ellos elegidos por ser de uso común, de obtención fácil y de precio bajo.

El testigo absoluto (TAB), estuvo conformado por el tepetate fragmentado y tamizado, pero sin planta, ni fertilizante, ni estiércol, sólo se le aplicó agua como al resto de los tratamientos. Originalmente, a partir de este testigo se determinarían, por comparación, los cambios ocurridos por efecto de cada factor, en el resto de las unidades experimentales, sin embargo, se decidió agregar un testigo más (T0), el cual corresponde a tepetate fragmentado y tamizado, sin planta, sin fertilizante, sin estiércol y sin riego, pero sometido a las mismas condiciones (de invernadero), que el resto de los tratamientos. Considerando que T0 representa mejor los rasgos originales del tepetate. Es a partir de éste, que se realizan las comparaciones de los parámetros físicos, químicos y mineralógicos del tepetate para determinar si ocurrieron cambios en el resto de las unidades experimentales.

Las dosis usadas para este experimento fueron:

Estiércol.-

120g que corresponden a 48 Mg ha^{-1} de materia orgánica (el contenido de humedad del estiércol utilizado fue del 40%, por lo que en realidad se adicionaron 200g del mismo).

Dosis de Fertilizante.-

- Alta.- 1.25g de sulfato de amonio, que corresponden a 100 kg/ha de nitrógeno.
1 g de superfosfato de calcio simple, que implican 80 kg/ha de P_2O_5 (fósforo).
0.25 g de cloruro de potasio, equivalente a 60 kg/ha de K_2O (potasio).
- Baja.- 0.625g de sulfato de amonio, que corresponden a 50 kg/ha de nitrógeno.
0.5 g de superfosfato de calcio simple que implican 40 kg/ha de P_2O_5 (fósforo).
0.125 g de cloruro de potasio, equivalente a 30 kg/ha de K_2O (potasio).

Las cantidades anteriores fueron calculadas tomando en cuenta las prácticas agrícolas que se acostumbran para este tipo de cultivos; cuadruplicando la cantidad de estiércol y duplicando la dosis de fertilización recomendadas por el INIFAP (INIFAP 2000, “recurso en línea”; <<http://www.inifap.gob.mx/>> consultado entre el primero de junio del 2012 y el quince de noviembre del 2012), para suelos agrícolas en un año. Estas cantidades también se determinaron considerando los bajos contenidos de materia orgánica y nitrógeno que existen en el tepetate.

Al cabo de 14 meses bajo condiciones controladas en el invernadero del Instituto de Geología, el experimento llegó a término y se analizaron los parámetros correspondientes.

3. Descripción del Experimento

Se utilizaron aproximadamente 400 kg de tepetate del municipio de Tetela del Volcán, extraídos dentro del área antes descrita. Este material se roturó y se tamizó para obtener la fracción menor a 10 mm y mayor a 2mm, los fragmentos menores a 2 mm fueron desechados. Las unidades experimentales fueron llenadas con este material, a algunas de ellas se les añadieron estiércol y/o fertilizante, y/o una planta de agave (*Agave angustifolia* Haw), en correspondencia a los tratamientos señalados en la tabla 1. El experimento se estableció en el invernadero del Instituto de Geología de la UNAM, a inicios de octubre del 2010 y hasta finales de noviembre del 2011.

El experimento tuvo una duración de 14 meses, durante los cuales se llevó a cabo el riego de todas las unidades experimentales, incluyendo aquellas sin planta (excepto T0), procurando mantener una lámina de agua de 1 cm en el fondo de cada unidad, con el fin de mantener condiciones de humedad similares en todas las unidades.

Al término del experimento, se tomaron muestras inalteradas para determinar conductividad hidráulica, densidad aparente, humedad a capacidad de campo, capacidad de agua disponible, así como muestras para elaboración de láminas delgadas.

Las plantas de agave fueron retiradas completas, se registraron sus características morfológicas y su peso (tanto fresco como seco), para estimar producción de biomasa. Posteriormente las plantas fueron cortadas para moler la “piña” (tallo), y así cuantificar azúcares en el extracto.

El tepetate restante de las unidades experimentales, se vació y se dejó secar al aire. Una vez que estuvo seco el material, se tomó una muestra de aproximadamente 2 kg para realizar el resto de los análisis de laboratorio.

4. Parámetros de Estudio

a) Propiedades del Tepetate

Algunos de los parámetros físicos y químicos seleccionados para su evaluación (clases de tamaño de partícula, estabilidad de partícula, pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables), han sido utilizados en trabajos previos, como indicadores tempranos del estado de mejoramiento o habilitación de tepetates, en cuanto a su potencial agrícola y forestal, (Covaleda *et al*, 2009; Pajares *et al*, 2010; Flores *et al*, 2011).

Otras propiedades (densidad aparente, conductividad hidráulica, capacidad de campo, punto de marchitez y capacidad de retención de agua disponible), se proponen por primera vez como indicadores de mejoramiento de tepetate roturado en condiciones de invernadero. En cuanto a los índices de intemperismo, se utilizan como indicadores directos de la meteorización que el tepetate sufrió bajo las condiciones experimentales.

En su conjunto, estos parámetros también se utilizan para determinar si la gestión a la que se somete un suelo o sustrato, es adecuada para aprovecharlo de manera sustentable (Herrick 2000; Shukla *et al*, 2006), pues son propiedades muy sensibles a las prácticas de uso (Marinari *et al*, 2006), y reflejan fácilmente los cambios en las funciones del suelo (Imaz *et al*, 2010). En nuestro caso, se consideraron apropiados para señalar cual de los tratamientos utilizados, fue el más adecuado para mantener, o mejorar, la capacidad del tepetate para sostener la productividad vegetal.

Toma de Muestras Inalteradas

Para determinar algunos parámetros físicos (densidad aparente, conductividad hidráulica, capacidad de campo y punto de marchitez), fue necesario obtener núcleos de tepetate inalterado, para lo cual se diseñó una barrena (figura 3A), que permitiera obtener muestras sin destruir la unidad experimental o dañar el agave (figura 3B), y de esta manera obtener los núcleos necesarios (figura 3C).

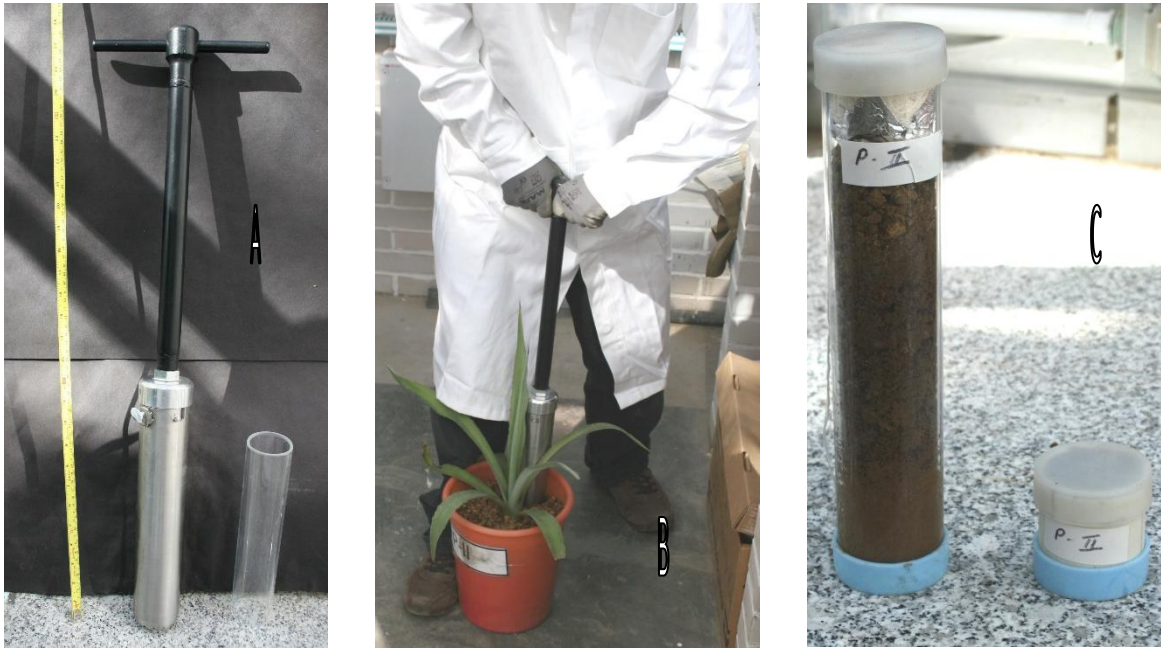


Figura 3. (A) Barrena diseñada para obtener muestras inalteradas a diferentes profundidades. Consiste en una camisa de acero de 28 cm de largo, dentro de la cual se introduce una columna de acrílico de 25 cm, o bien, varios cilindros de PVC de 5 cm de largo, dentro de los cuales quedará contenido el sustrato. (B) Toma de muestra. La barrena se introduce por un extremo de la unidad experimental, evitando dañar al agave. De esta manera es posible tomar varios núcleos inalterados. (C) Núcleos inalterados; el de la izquierda, de 25 cm de largo, se utilizó para la determinación de la conductividad hidráulica a lo largo de toda la unidad experimental, mientras que el de la derecha, de 5 cm de largo, es similar a los usados para la evaluación de densidad aparente, capacidad de campo, y punto de marchitez.

Propiedades Físicas

Con base en los procedimientos descritos en el libro: *Methods of Soil Analysis* (Klute, 1986), y el *Manual de Procedimientos Analíticos* (Flores L. y Alcalá R., 2010, “recurso en línea”), se realizaron las determinaciones de las siguientes propiedades físicas del tepetate:

1. Densidad aparente por el método del cilindro de volumen conocido. Se tomaron muestras inalteradas en cada unidad experimental (figura 3B), a una profundidad que abarcó de los 5 hasta los 10 cm. La muestra se tomó con un cilindro de volumen previamente determinado (figura 3C), al secar esta muestra a 110 °C, se obtuvo el peso del tepetate contenido en dicho volumen, pudiendo así calcular la densidad aparente.

Este dato funciona como un indicador del grado de compactación del tepetate, y por tanto, de la resistencia de éste al crecimiento de las raíces (Reynolds *et al.*, 2002).

2. Conductividad hidráulica saturada, por aplicación directa de la Ley de Darcy. A muestras inalteradas (figura 3C y 4B), previamente saturadas con agua, que comprendieron la profundidad total de las unidades experimentales (aproximadamente 20 cm), se les aplicó una carga de agua constante (figura 4A), registrando el volumen de agua que atravesaba dicha muestra en intervalos de tiempo definidos (figura 4C). Con los datos obtenidos se calculó la velocidad a la que el agua pasaba a través de la masa de tepetate. Se consideró la profundidad total de las unidades experimentales, porque esta comprende el sitio donde se establecen las raíces de la mayoría de los cultivos comerciales en campo.

La evaluación de este parámetro, permite detectar cambios en la capacidad del suelo para conducir un flujo de agua, a través de sus poros (Schoenholtz *et al.*, 2000). Ya que uno de los principales problemas del tepetate, para el establecimiento de cobertura vegetal, es la baja permeabilidad que presenta, el mejoramiento de esta propiedad es de mucha importancia para su habilitación.

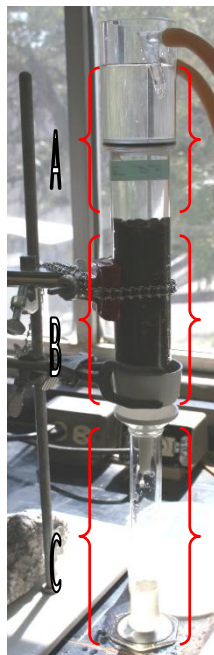


Figura 4. Determinación de la conductividad hidráulica. (A) Una carga de agua constante se aplica sobre una muestra de tepetate inalterada (B). El volumen de agua que atraviesa la muestra es registrada (C) a intervalos de tiempo regulares.

3. Capacidad de campo determinada con membrana y plato de presión. Por cada unidad experimental, una muestra inalterada que abarcó desde los 5 hasta los 10 cm de profundidad fue saturada con agua, después, se sometió a 1 atm de presión negativa (succión), hasta desalojar el exceso de humedad, finalmente, se determinó la cantidad de agua retenida en contra de la succión por medio de gravimetría.

Ya que la Capacidad de Campo representa la máxima cantidad de agua que el suelo puede retener en contra de la fuerza de gravedad (Rodríguez-Fuentes y Rodríguez-Absi 2002), un incremento en los valores de esta propiedad puede reflejar mejoras en cuanto a la textura, porosidad, estructura y contenido de materia orgánica del tepetate. Lo cual, a su vez, resultaría favorable en cuanto al potencial del tepetate para prestar servicios ambientales.

4. Punto de marchitez determinado con membrana y plato de presión. La medición se realizó de la misma manera que el parámetro anterior, variando únicamente la presión negativa ejercida, que en este caso correspondió a 15 atm.

La evaluación del Punto de Marchitez, permite conocer el límite inferior del intervalo de agua disponible para las plantas (Rodríguez-Fuentes y Rodríguez-Absi 2002). El mejoramiento de las propiedades físicas del tepetate podría involucrar la reducción de este parámetro, lo cual hace necesaria su evaluación.

5. Capacidad de retención de agua disponible (calculada a partir de los dos anteriores). La cantidad de agua disponible para las plantas se obtuvo por diferencia de los dos parámetros anteriores, en los que se restó el valor correspondiente al punto de marchitez permanente del valor de capacidad de campo.

En general, la Capacidad de Retención de Agua Disponible, se refiere a la cantidad de agua retenida por el suelo y que puede ser absorbida por las plantas (Flores L., y Alcalá R., 2010). Cuantificar este parámetro, permite determinar cuales fueron los tratamientos, bajo los cuales el tepetate puede retener una mayor cantidad de agua, para sostener una cobertura vegetal.

6. Clases de tamaño de partícula, (según el método para determinar agregación en seco de Klute, 1986). De cada unidad experimental se tomó aproximadamente 1 kg de tepetate, que se hizo pasar por una columna de tamices de 10, 5, 2, 1 y 0.25 mm de abertura. Posteriormente se pesaron cada una de las fracciones, los resultados reflejaron el diámetro medio de los granos o partículas que componen al tepetate roturado y se expresaron como porcentajes del total de la muestra.

El término “Clases de Tamaño de Partícula” (CTP), se usa para caracterizar la composición del tamaño de grano para todo el suelo, incluyendo la tierra fina y los fragmentos de roca y para-roca hasta el tamaño de un pedón (Soil Survey Staff (USDA) 2010A). Su evaluación en este tipo de estudios, permite detectar procesos de agregación-disgregación y/o cementación-dispersión, lo cual, pondría en evidencia la gradación de las partículas del tepetate, influenciada por los distintos factores experimentales. En este caso, no se llevó a cabo una diferenciación entre agregados reales y fragmentos.

7. Estabilidad de las clases de tamaño de partícula en húmedo (por el método de estabilidad de agregados de Klute, 1986). Las muestras de tepetate de aproximadamente 200 g, previamente humedecidas, se hicieron pasar por una columna de tamices de 5, 3, 2, 1, 0.5 y 0.25 mm de abertura. Dicha columna permaneció inmersa en un contenedor de agua mientras se agitaba, (1 minuto de agitación moderada), la fracción retenida en cada tamiz se secó a 110 °C y posteriormente las fracciones fueron pesadas. La fracción menor a 0.25 mm se estableció con la diferencia entre el peso inicial de la muestra y la suma del peso de las fracciones secas. Los resultados se expresaron como porcentajes.

Determinar la Estabilidad de las Clases de Tamaño de Partícula, ayuda a identificar los tratamientos (formas de uso), bajo los cuales, es posible mantener o incrementar, las fuerzas de cohesión que mantienen unidos a los granos de tepetate. Lo cual, a su vez, disminuiría la erosión, permitiría el desarrollo de raíces y mejoraría el balance de aire/agua dentro del tepetate.

Características Químicas

Con base en los procedimientos descritos en el libro: *Methods of Soil Analysis* (Sparks, 1996), se realizaron las determinaciones de las siguientes propiedades químicas del tepetate:

1. pH con H₂O y CaCl₂ (0.01M), en relación 1 : 2.5 por el método potenciométrico. Se determinó la actividad del ión H⁺ en la suspensión sobrenadante del suelo, mediante el uso de un electrodo de referencia. Diez gramos de muestra en 25 ml de solución, se agitaron durante 12 horas, después de 30 minutos de reposo, se llevó a cabo la medición. Las determinaciones con agua y con CaCl₂, se llevaron a cabo por separado. El CaCl₂ ayuda a disminuir el efecto de sales solubles que se presenta al usar agua pura.

Algunos procesos, como: la adsorción-desorción iónica que opera en el complejo de cambio, la dinámica de degradación-acumulación de materia orgánica, el intemperismo mineral, la actividad metabólica de las raíces de las plantas y la respiración de los organismos, alteran la capacidad ácido-base del suelo, lo cual se refleja en cambios en el potencial hidrógeno del mismo (Aguirre A., 2006), por tanto, las determinaciones de pH son indispensables como parte de un monitoreo en las funciones y/o propiedades del suelo, y sería un reflejo del mejoramiento de la vocación agrícola del tepetate.

2. Materia orgánica se evaluó usando la metodología de Walkley y Black, por oxidación con dicromato de potasio. Se oxidó la materia orgánica en presencia de dicromato de potasio y ácido sulfúrico, posteriormente, el dicromato de potasio residual se valoró por titulación con sulfato ferroso. Las muestras consistieron en 0.5 g de tepetate secado al aire y tamizado a 0.1 mm para asegurar la completa reacción del carbono orgánico.

Debido a que la materia orgánica interviene en propiedades del suelo como; disponibilidad de nutrimentos, capacidad de retención de agua y densidad aparente,

entre otros, se le considera como un indicador de “salud” de suelos agrícolas (Schoenholtz *et al.*, 2000), por lo que el monitoreo de este parámetro es importante para determinar prácticas de uso que lleven a ampliar las aptitudes del tepetate, para sostener una cobertura vegetal.

3. Capacidad de Intercambio Catiónico por el método volumétrico del versenato (Jackson, 1970). Un gramo de muestra fue tamizada a 2 mm y se saturó el complejo de cambio con una solución de CaCl_2 (1N), el exceso de CaCl_2 se retiró lavando la muestra con alcohol etílico; agitando, centrifugando a 3000 RPM y desechando el sobrenadante. Posteriormente, el catión calcio fue extraído saturando nuevamente el complejo de cambio con una solución de NaCl (1N). El calcio obtenido se valoró por titulación con versenato (EDTA). El resultado fue expresado en $\text{cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$.

Al igual que en el caso de la materia orgánica, la Capacidad de Intercambio Catiónico, se considera como un indicador químico sobre las aptitudes naturales del suelo para sostener vegetación (Schoenholtz *et al.*, 2000), específicamente, sobre la capacidad de éste para almacenar y proporcionar nutrimentos a las plantas. Por tanto, en este trabajo, su cuantificación permite reconocer cuales son los tratamientos, bajo los cuales el tepetate puede mantener o incrementar, la disponibilidad de nutrimentos para las plantas.

4. Bases intercambiables por volumetría con Versenato para Ca^{2+} y Mg^{2+} , y flamometría para Na^{1+} y K^{1+} . Se tomaron muestras de un gramo tamizadas a 2 mm. Las bases fueron extraídas saturando el complejo de cambio con una solución de acetato de amonio (1N pH 7). Las cantidades de Ca^{2+} y Mg^{2+} fueron determinadas por titulación con versenato (EDTA), mientras que Na^{1+} y K^{1+} se determinaron por flamometría. El resultado fue expresado en $\text{cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$.

Bases Intercambiables es un parámetro químico del suelo, que muestra la disponibilidad específica de los nutrimentos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{1+} , y K^{1+}), para las plantas (Schoenholtz *et al.*, 2000). Ofrece información sobre cuáles son los tratamientos, o factores, que propician el aumento o pérdida de cada base en particular.

5. Óxidos de elementos mayores (para el cálculo de Índices de intemperismo), por fluorescencia de rayos X. Se tamizó un gramo de muestra compuesta (preparada a partir de cantidades iguales de tepetate, proveniente de cada una de las cuatro repeticiones que conforman cada tratamiento, dando un total de 13 muestras compuestas), con tamiz de malla 230 (0.0625 mm de apertura). Estas se fundieron en base seca (a 950 °C) y se analizaron por fluorescencia de rayos X. Elementos mayores se midieron con el programa CONTROLM.QAN.

Los Índices de Intemperismo evaluados fueron cinco y corresponden al índice de Parker (IP), relación sílice-aluminio (SA), índice alteración química (CIA), relación bases-alúmina (Bases/Alúmina), y relación bases-sesquióxidos (Bases/R₂O₃). Dichos índices se calcularon de la siguiente manera:

$$IP = \{((K_2O/pm)/0.25) + ((Na_2O/pm)/0.35) + ((CaO/pm)/0.7) + ((MgO/pm)/0.9)\} * 100$$

donde pm se refiere al peso molecular del compuesto

$$SA = (SiO_2/pm) / (Al_2O_3/pm)$$

$$CIA = \{(Al_2O_3/pm) / ((Al_2O_3/pm) + (K_2O/pm) + (Na_2O/pm) + (CaO/pm))\} * 100$$

$$Bases/Alúmina = \{(K_2O/pm) + (Na_2O/pm) + (CaO/pm) + (MgO/pm)\} / (Al_2O_3/pm)$$

$$Bases/R_2O_3 = \{(K_2O/pm) + (Na_2O/pm) + (CaO/pm) + (MgO/pm)\} / \{(Al_2O_3/pm) + (Fe_2O_3/pm) + (TiO_2/pm)\}$$

“Los índices de intemperismo representan una estrategia ampliamente utilizada, para determinar la naturaleza y el impacto de los procesos químicos sobre el intemperismo *per se*, y también sobre la pedogénesis” (Darmody *et al.*, 2005), dicho de otra manera; permiten descubrir cómo y qué tan intensamente influyen los distintos tratamientos (formas de uso), sobre las características químicas originales del tepetate.

Análisis Estadísticos

La evaluación estadística de las propiedades físicas y químicas se realizó mediante un análisis de varianza y se utilizó la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) en las medias con el programa JMP- Statistical Discovery Software, versión 5.1, (2002).

b) Agave

Características Morfológicas

- Altura (medida de manera perpendicular desde la superficie del tepetate hasta la punta del meristemo, sin considerar la espina), número de hojas (se tomaron en cuenta todas la pencas, jóvenes y viejas, pero no el meristemo), ancho de la hoja (se registró únicamente el valor obtenido en la parte más amplia de la hoja más desarrollada), largo de la hoja (se registró sólo el valor de la hoja más desarrollada, partiendo desde la base de la hoja, hasta la punta, sin considerar la espina), número de raíces (sólo se consideraron raíces primarias), longitud de raíces (sólo el valor máximo alcanzado por cada planta). Variables analizadas según lo sugerido por Nikolaeva y Niño, 2007.

Biomasa

- Peso total (registrado en fresco con la planta completa: biomasa aérea + subterránea); peso fresco de la piña o tallo (se cortaron hojas y raíz, estas se cuantificaron por separado); peso fresco hojas (peso total de todas las hojas, sin raíz, ni piña); peso seco hojas (las hojas se secaron en estufa a 60 °C hasta peso constante); peso fresco raíz (peso de la raíz, sin hojas, ni piña); peso seco raíz (se secaron en estufa a 60 °C hasta obtener un peso constante). Variables analizadas según lo sugerido por Nikolaeva y Niño, 2007.

Calidad del Agave (extracto)

- Cuantificación de azúcares reductores totales (ART), por el método de Lane-Eynon (NORMEX 2005). La piña o tallo se trituró con un extractor (marca TURMIX modelo "Comercial"), para obtener un mosto, el cual se filtró con el fin de eliminar el exceso

de pulpa y el bagazo. En el jugo ya filtrado se determinó el contenido de azúcares, por medio de la reducción de una solución de sulfato de cobre. Las soluciones de cobre tienen un color azul, pero al reducir el cobre con el azúcar (en presencia de calor), la solución se torna roja. La estandarización previa del sulfato de cobre, con una solución de concentración conocida de azúcar, permite saber exactamente cuantos gramos de azúcar se requieren para inducir la reducción total del cobre y por tanto el cambio de color.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Parámetros del Tepetate

a) Propiedades Físicas

En la tabla 4 se muestran los resultados de las determinaciones de varios parámetros físicos. Se incluye la media de las cuatro repeticiones de cada tratamiento con el respectivo error estándar de la muestra.

Tabla 4. Propiedades Físicas del Tepetate

Tratamiento	Densidad aparente (Mg m ⁻³)	Conductividad hidráulica (cm h ⁻¹)	Capacidad de campo (%)	Punto de marchites (%)	Retención de agua disponible (%)
T O	1.4 ±0.01 a	194.2 ±6.4a	19.9 ±0.0 a	nd	nd
TAB	1.4 ±0.01 a	19 ±1.2 bc	20.7 ±0.0 a	17.0 ±0.4 a	3.7 ±0.4 a
TDB	1.4 ±0.06 a	15.3 ±2.0 bc	22.0 ±0.4 a	17.9 ±0.3 a	4.1 ±0.2 a
TDA	1.4 ±0.02 a	24 ±7.6 b	21.1 ±0.0 a	18.5 ±0.0 a	2.6 ±0.0 a
TE	1.3 ±0.04 a	4.6 ±2.1 bc	20.6 ±0.5 a	nd	nd
TEDB	1.3 ±0.04 a	7 ±0.2 bc	22.3 ±0.5 a	16.8 ±2.2 a	5.5 ±2.7 a
TEDA	1.3 ±0.04 a	7.2 ±2.2 bc	22.2 ±1.2 a	17.4 ±0.3 a	4.8 ±1.5 a
P	1.4 ±0.03 a	0.6 ±0.0 bc	21.9 ±0.1 a	16.5 ±0.5 a	5.4 ±0.4 a
PDB	1.4 ±0.03 a	0.4 ±0.2 bc	22.2 ±0.4 a	18.3 ±0.3 a	3.9 ±0.7 a
PDA	1.4 ±0.04 a	0.1 ±0.1 bc	21.7 ±1.0 a	16.6 ±0.2 a	5.1 ±1.3 a
PE	1.3 ±0.03 a	0.3 ±0.0 bc	24.6 ±2.7 a	18.8 ±1.4 a	5.8 ±1.3 a
PEDB	1.4 ±0.02 a	0.1 ±0.1 bc	21.8 ±0.4 a	19.0 ±1.2 a	2.8 ±1.6 a
PEDA	1.3 ±0.02 a	0.3 ±0.1 c	22.3 ±0.7 a	18.8 ±0.4 a	3.5 ±1.0 a

Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=4$, con su respectivo error estándar; y donde: T0: Material original, roturado y tamizado, pero sin enmiendas, planta, ni riego, TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta; nd= datos no disponibles. Densidad aparente determinada por el método del cilindro de volumen conocido. Conductividad hidráulica por aplicación de la Ley de Darcy. Capacidad de campo, punto de marchitez y retención de agua disponible evaluados con membrana y plato de presión.

Densidad Aparente (DA)

Se observa una disminución mínima de la DA, en los tratamientos que contienen estiércol (diferencia de apenas 0.1 Mg m^{-3} , excepto para PEDB), con respecto a los tratamientos sin estiércol (tabla 4), tal como se esperaría de un sustrato al que se le ha adicionado materia orgánica (Buckman y Brady 1985), pero sin que esto involucre diferencias estadísticas significativas.

Todos los valores obtenidos se pueden considerar como altos, propios de suelos minerales arenosos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2002), que son, en principio, restrictivos para el crecimiento de las raíces (Porta *et al.*, 1999; Soil Survey Staff (USDA), 2010B, recurso en línea), sin embargo, dichos valores, se ubicaron en el límite inferior de lo reportado en la literatura para tepetates en campo (1.45 a 1.9 g/cm^3 , Flores *et al.*, 1996, Acevedo 1998, Gama *et al.*, 2007), por lo tanto, los resultados constituyen una mejora de hasta 0.6 g/cm^3 , en todos los tratamientos, con respecto a las características originales del tepetate.

Esta mejora es atribuible, principalmente, a la roturación previa del material, y en segunda instancia, a las prácticas de uso (tratamientos), a la que se sometieron cada una de las unidades experimentales (Prat *et al.*, 2003), en ese sentido; la adición de estiércol constituyó el factor más efectivo para disminuir la DA.

Conductividad Hidráulica (CH)

En campo, la CH del tepetate inalterado resulta extremadamente reducida (desde 5.4×10^{-4} , hasta 130×10^{-4} cm/hora, según lo reportado por Nimlos y Hillery, 1990), por otro lado, en tepetates habilitados (roturados, abonados y cultivados durante varios años), se han registrado valores considerablemente más altos, desde 0.45 cm/hora (muy lenta), hasta 27 cm/hora (muy rápida), dependiendo de la época del año y de la fase del ciclo en la que se encuentre el cultivo (Fechter y Flores, 1997; Prat *et al.*, 2003), sin embargo, no se encontraron datos publicados sobre este parámetro en muestras inalteradas en laboratorio. Tampoco se tiene conocimiento sobre otros estudios de CH en tepetate, bajo condiciones similares a las que se realizó el presente experimento.

Dentro de las características físicas analizadas, la CH resultó la propiedad física del tepetate más modificada por los tratamientos (tabla 4), pues se observan tendencias muy evidentes (figura 5A), donde el factor planta disminuyó el movimiento del agua, así mismo, la adición de estiércol promovió la disminución de la CH.

En la figura 5B se muestra únicamente el comportamiento de los tratamientos con planta (ya que en la figura 5A no es posible apreciarlos a detalle), donde destaca que aquellos que además contienen estiércol, presentan un valor de CH ligeramente menor, con respecto a los que no se les adicionó esta enmienda, no obstante, entre ellos tampoco se observaron diferencias estadísticas significativas.

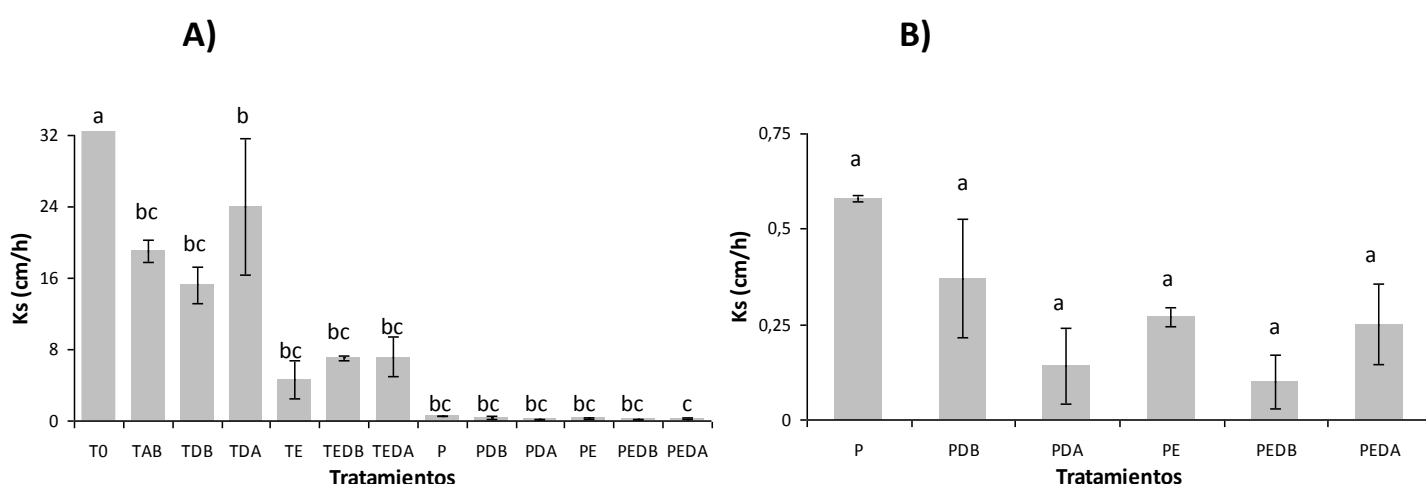


Figura 5. (A) Conductividad hidráulica evaluada con muestras inalteradas que abarcaron la profundidad total de las unidades experimentales. (B) Detalle de Conductividad hidráulica de los tratamientos que incluyeron al

factor planta. Estos presentaron una velocidad en el movimiento del agua más reducida que el resto de los tratamientos. En ambas figuras letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Se grafican medias de $n=4$. Líneas de variabilidad que representan el error estándar. Donde: T0: Material original, roturado y tamizado, pero sin enmiendas, planta, ni riego, TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

Para comprobar cual de los dos factores (estiércol o planta), fue el que promovió con más fuerza las variaciones, se compararon aquellos tratamientos con planta (P, PDB, PDA, PE, PEDB y PEDA), contra los que carecían de ella (TAB, TDB, TDA, TE, TEDB y TEDA), excluyendo de esta prueba a T0, (figura 6A). Por otra parte, se realizó la misma comparación entre los tratamientos con estiércol (TE, TEDB, TEDA, PE, PEDB y PEDA), contra los que carecían de él (TAB, TDB, TDA, P, PDB, PDA), dejando fuera, de nueva cuenta a T0, pues este es el único tratamiento que además careció de riego (figura 6B).

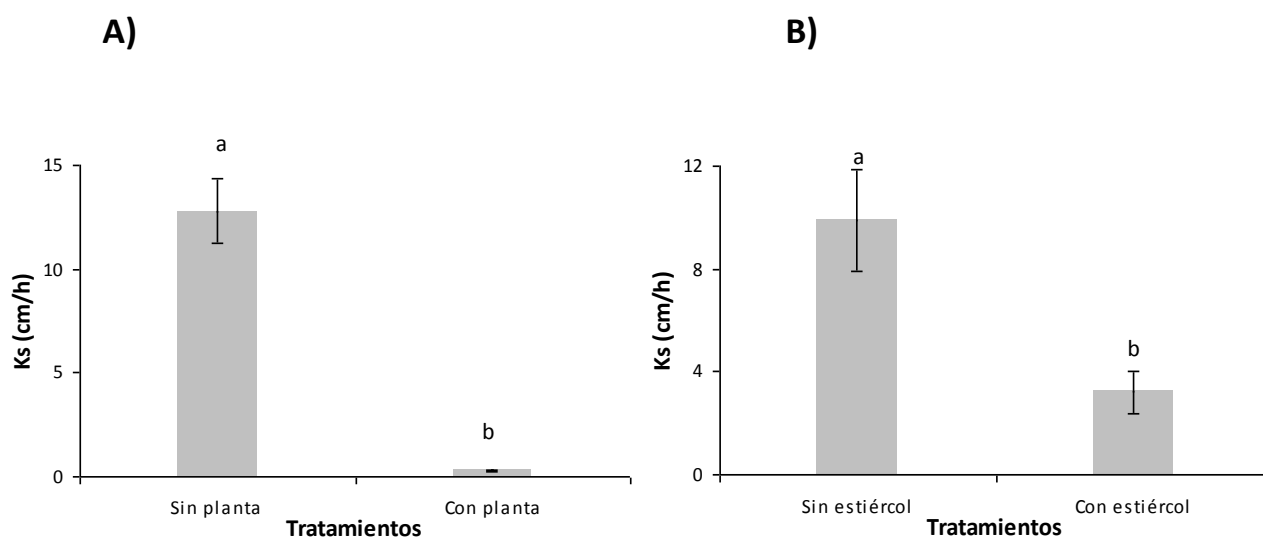


Figura 6. (A) Comparación entre los valores promedio de conductividad hidráulica de los tratamientos con planta y los tratamientos sin planta (excepto T0). Se aprecia que la planta ocasionó un descenso notable en la velocidad de desplazamiento del agua. (B) Comparación de la conductividad hidráulica entre los tratamientos con estiércol y sin estiércol (excepto T0), donde se observa que aquellos a los que se les agregó materia orgánica presentan un valor promedio de conductividad hidráulica más bajo. En ambas figuras letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Se grafican medias de $n=24$. Las líneas de variabilidad que representan el error estándar.

De ambas comparaciones resalta que tanto el factor planta, como el factor estiércol, promovieron diferencias significativas, lo cual sugiere que ambos factores actuaron en conjunto, ocasionando un descenso en el movimiento del agua con respecto a aquellos tratamientos que no tuvieron planta o que no tuvieron estiércol, sin embargo, el factor que más influyó fue la planta (que en la prueba estadística mostró un valor de $P < 0.0001$, lo cuál la hace altamente significativa), por sobre el estiércol ($P=0.0017$). Por lo anterior, resulta comprensible que aquellos tratamientos que incluyeron tanto el factor planta como el factor estiércol (PE, PEDB y PEDA), hayan sido los que presentaron los valores de CH más bajos (tabla 4). En cuanto al fertilizante inorgánico (figura 7), este factor no parece haber afectado la conductividad hidráulica (no hubo diferencias estadísticas significativas).

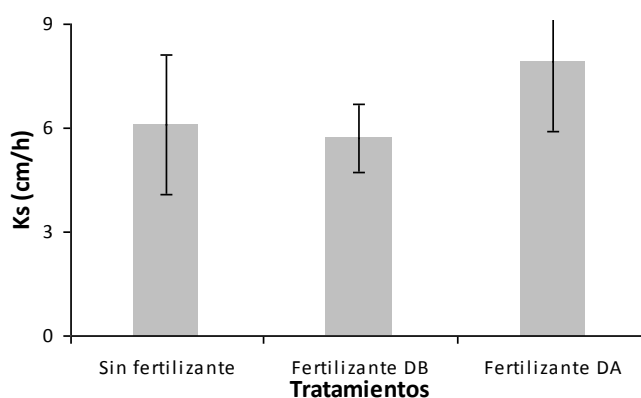


Figura 7. Comparación de la conductividad hidráulica entre tratamientos con distintas dosis de fertilizante (excepto T0), donde no se observan diferencias en el comportamiento de la conductividad hidráulica (no hubo diferencias estadísticas significativas). Se grafican medias de $n=16$. Las líneas de variabilidad que representan el error estándar. Donde: DB.- dosis baja. DA.- dosis alta.

Otro aspecto importante, es que el testigo T0, al que no se le suministró agua durante el transcurso del experimento, mostró valores de conductividad hidráulica bastante altos, comparados con el resto de los tratamientos (figura 8). Lo cual indica que el riego jugó un rol importante al definir el comportamiento del agua al interior de las unidades experimentales.

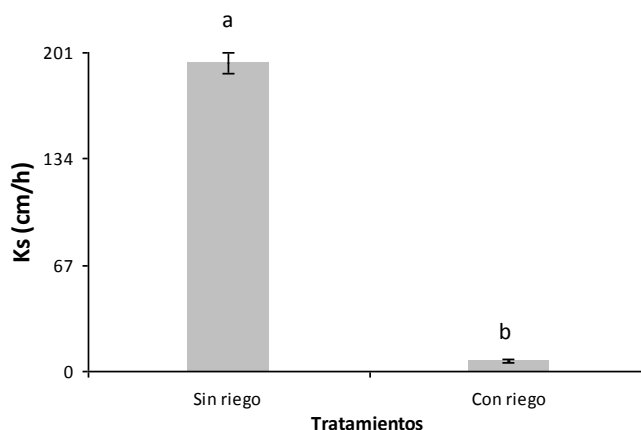


Figura 8. Comparación de la conductividad hidráulica entre T0 (sin riego y n=4), y el resto de los tratamientos (con riego y n=48), donde se observa que aquellos que fueron regados presentan un valor promedio de conductividad hidráulica mucho más bajo. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas. Las líneas de variabilidad que representan el error estándar.

Para entender por qué los valores de conductividad hidráulica disminuyeron en los tratamientos con planta, y se vieron afectados por la presencia de estiércol, se tomaron cuatro de las muestras utilizadas para determinar conductividad hidráulica (las muestras correspondieron a las unidades experimentales: TAB I, TE III, P II y PE II, las cuales presentaron valores de 18, 7.6, 0.57 y 0.25 cm/h respectivamente), cada una de estas muestras se dividió en cuatro secciones que correspondían a 0-5, 5-10, 10-15 y hasta 15-20 cm de profundidad. A cada sección se le caracterizó el tamaño de fragmento, tamizando las muestras con tamices de apertura de: 10, 5, 2, 1 y 0.25 mm, la fracción retenida en cada uno de estos tamices se pesó y el resultado fue expresado en porcentaje.

El objetivo de esta prueba fue establecer si la reducción de los valores de conductividad hidráulica, fue ocasionada por un taponamiento de los poros por acción del material más fino.

En la tabla 5 se observa la cantidad de fragmentos (en porcentaje), ordenados por tamaño, donde resalta que las muestras con valores de conductividad hidráulica más altos contienen menor cantidad de material fino, mientras que aquellas con conductividad hidráulica reducida tienen material fino en mayores cantidades. Esto puede observarse con más claridad en la figura 9.

Tabla 5. Tamaño de fragmentos que componían las muestras de conductividad hidráulica

Muestra	ks (cm/h)	----- % -----					
		< 0.25mm	0.25 a 1mm	1 a 2mm	2 a 5mm	5 a 10mm	> 10mm
TAB I	18	10.0	20.3	27.0	53.3	95.1	100
TE III	7.6	11.3	22.4	30.0	60.9	92.7	100
P II	0.57	11.5	25.1	33.8	65.8	95.0	100
PE II	0.25	14.5	30.5	40.7	73.5	95.8	100

ks= conductividad hidráulica. Los porcentajes presentados son acumulativos. Donde: TAB: testigo absoluto; TE: tepetate estiércol; P: planta (agave); PE: planta estiércol.

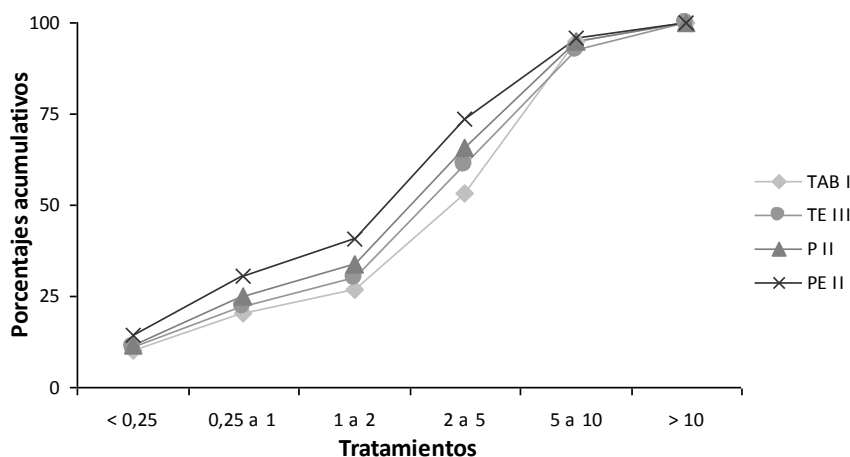


Figura 9. Tamaño de fragmentos encontrados en las muestras de conductividad hidráulica, presentados en porcentaje. Aunque los cuatro comparten prácticamente la misma cantidad de fragmentos gruesos (5 a 10 y >10 mm), los tratamientos con planta (PII y PEII), contienen mayores concentraciones de material de tamaño medio (<5 a 0.25mm) y fino (<0.25). Se grafican n=1 y donde: TAB: testigo absoluto; TE: tepetate estiércol; P: planta (agave); PE: planta estiércol.

En la figura 10 aparece únicamente el contenido de material fino (fracción menor a 0.25 mm), de las cuatro muestras, donde se distingue que la cantidad de finos aumenta de manera conjunta a la profundidad, hasta alcanzar su máxima expresión en el fondo (15 a 20 cm de profundidad), también destaca su distribución, pues el material fino no sólo se concentra en la parte más baja, si no que también se encuentran cantidades mayores de él repartidas en el resto de las secciones, en aquellas muestras con valores de CH más bajos, por ejemplo, para la muestra PE II, que exhibe la mayor cantidad de partículas menores a 0.25 mm, distribuidas de manera un tanto uniforme en sus cuatro secciones, la conductividad hidráulica corresponde a apenas 0.25 cm/h (extremadamente lenta), mientras que para TAB I, que tiene la menor cantidad de material fino, que además se

encuentra concentrado únicamente en las secciones más profundas (10 a 15 y 15 a 20 cm), la conductividad hidráulica alcanza hasta 18 cm/h (muy rápida), (interpretación de conductividad hidráulica tomada de Flores y Alcalá 2010, recurso en línea).

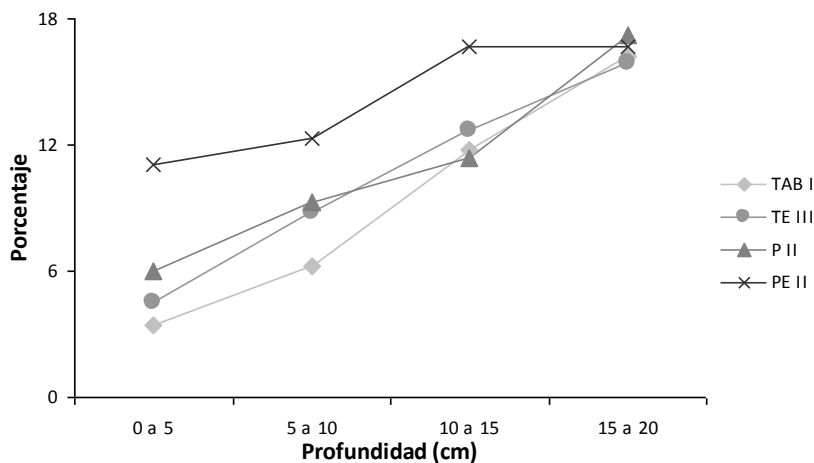


Figura 10. Fracción <0.25 mm contenida en las muestras donde se evaluó conductividad hidráulica. El contenido de material fino aumenta con la profundidad en las cuatro muestras, alcanzando su máximo en el fondo. Se grafican n=1 y donde: TAB: testigo absoluto; TE: tepetate estiércol; P: planta (agave); PE: planta estiércol.

De las observaciones anteriores, se refuerza la idea de que la reducción del movimiento del agua dentro de las unidades experimentales, se debe a obstrucciones ocasionadas por la presencia del material fino, pero también, que esta disminución se encuentra relacionada a la manera en como éste material se distribuye a lo largo del perfil de las unidades. El material fino, al parecer, tuvo su origen en la dispersión de los fragmentos más gruesos de tepetate. En suelos, se ha determinado que las partículas más finas que se desprenden de los macro agregados, ocupan los espacios disponibles entre agregados, modificando así la cantidad, distribución, la forma y el tamaño de los poros (así como la tortuosidad), lo cual dificulta el paso del agua y por tanto ocasiona una disminución en cuanto a los valores de CH, (Unger P., 1996; Hillel D., 1998; Lal y Shukla 2004, Gonçalves *et al.*, 2007). El mismo fenómeno se ha observado para tepetates roturados en condiciones de campo, donde las lluvias fuertes lavan las partículas finas, lo cual lleva a la formación de recubrimientos superficiales que sellan los poros y por tanto se produce una reducción en la filtración del agua y la aeración (Báez *et al.*, 2007).

En cuanto a la disminución de la CH observada en los tratamientos con estiércol (figura 6B), se sabe que en suelos regados con aguas residuales; los sólidos orgánicos suspendidos, el crecimiento excesivo de microorganismos y algunos de los productos de la descomposición de la materia orgánica llevada a cabo por bacterias, pueden promover la obstrucción de los poros (Hillel D, 1998; Bhardwaj *et al.*, 2007; Gonçalves *et al.*, 2007).

En el caso de nuestro experimento, durante la toma de muestras, en todos los tratamientos que incluyeron estiércol, se observó que éste se concentraba principalmente en el fondo, formando capas que bien pudieron entorpecer el paso del agua. En trabajos llevados a cabo con núcleos inalterados de suelo, se ha encontrado la misma disminución en la CH, debido a la obstrucción parcial de los poros conductores, por acción de la materia orgánica (Bhardwaj *et al.*, 2007; Gonçalves *et al.*, 2007).

En general, la diferencia en la velocidad a la cual se mueve el agua dentro de los distintos tratamientos, es atribuible al efecto de cada factor (planta y riego), que ocasionaron cambios en cuanto al tamaño y la distribución de las partículas del tepetate, o bien, entorpecieron directamente (estiércol), el paso del agua mediante la obstrucción de los poros.

Los valores de CH observados en los tratamientos con planta se encuentran cercanos a los encontrados en campo para tepetates con cuatro años de cultivo (Fechter y Flores, 1997; Prat *et al.*, 2003), lo cual indica una evolución bastante rápida de este parámetro bajo las condiciones experimentales propuestas.

Es probable que el material fino, y los sólidos orgánicos suspendidos, en el fondo de las unidades experimentales, hayan constituido fuentes de error en la determinación de la CH. Por tanto, se sugiere que este parámetro sea evaluado sin los últimos centímetros de la columna de tepetate, o bien, realizar la prueba de CH, a distintos intervalos de profundidad.

Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitez Permanente (PMP) y Retención de Agua Disponible (AD)

En lo que respecta a capacidad de campo, punto de marchitez permanente y capacidad de retención de agua disponible para las plantas (tabla 4), no se observan cambios significativos o tendencias en ningún caso. En general los resultados son homogéneos, donde todos los tratamientos muestran valores de CC cercanos a 21.8%, PMP a 17.8% y AD de 4.3% (figura 11).

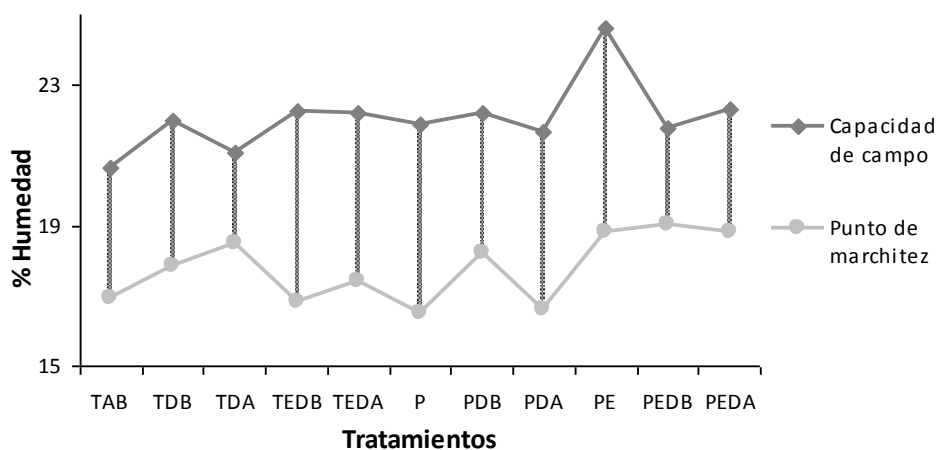


Figura 11. Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente. El área entre ambos parámetros (líneas verticales), representa el porcentaje de Retención de Agua Disponible para las plantas. No se observan efectos de tratamiento o diferencias significativas. Se grafican medias de $n=4$. Donde: TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

La CC resultó baja en comparación con la obtenida por otros autores, quienes reportaron capacidades de campo de hasta 40% para tepetates roturados y tamizados pero no habilitados (Campos *et al.*, 2004), y del 30% para tepetates roturados ya incorporados al proceso productivo en campo (Prat *et al.*, 2003), por el contrario, el PMP coincide con lo obtenido por Prat y colaboradores (2003), quienes obtuvieron valores cercanos al 18%.

El PMP relativamente alto, puede tener su origen en el contenido de arcillas minerales y amorfos que se sabe contienen los tepetates (Etchevers *et al.*, 1992; Flores *et al.*, 1996; Acevedo 1998), pues estos retienen al agua con gran fuerza (Buckman y Brady, 1985; Hillel, 1998).

Por otro lado, los valores tan bajos en cuanto a la CC pueden ser atribuidos, en parte, al bajo contenido de material orgánico (Prat *et al.*, 2003). Sin embargo, la razón principal podría tener su origen en la escasa presencia de poros de tamaño medio, y en su lugar, el espacio poroso podría estar constituido principalmente por poros finos al interior de los fragmentos de tepetate, y por macroporos que drenan con facilidad (Rodríguez-Fuentes y Rodríguez-Absi 2002).

La existencia de macroporos pudiera parecer contraria a la reducida conductividad hidráulica descrita anteriormente, no obstante, si los poros no se encuentran conectados entre sí, estos se ven incapacitados para permitir el paso del agua a lo largo del perfil. Además, es conveniente señalar que las muestras inalteradas utilizadas para determinar CC, PMP y AD, comprendieron únicamente de los 5 a los 10 cm de profundidad de las unidades experimentales, donde dominan los fragmentos gruesos mayores a 2 mm (figura 12), mientras que las muestras utilizadas para medir la CH abarcaron desde los 0 hasta los 20 cm de profundidad (la totalidad de la unidad experimental), donde se observó un aumento progresivo de material fino con respecto a la profundidad (figura 12). De este modo, la principal reducción en la velocidad del agua, pudo tener lugar en los últimos centímetros de la columna de suelo.

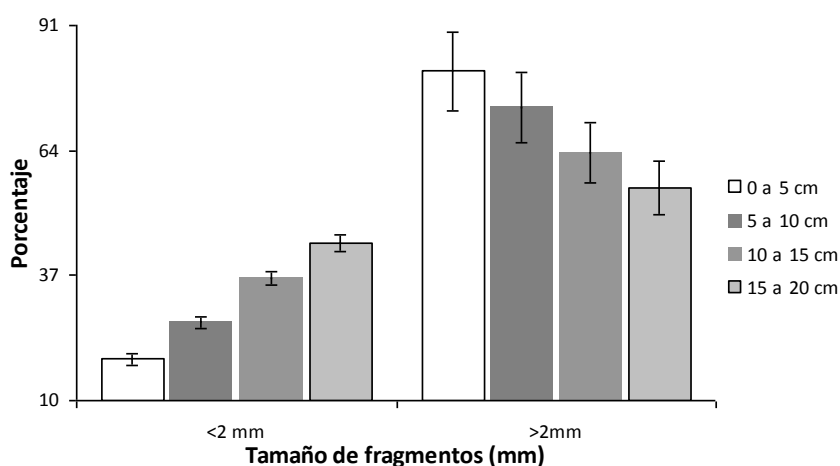


Figura 12. Relación de porcentajes de fragmentos menores y mayores de 2 mm, encontrados a lo largo de la columna del tepetate. Se observa un aumento en el contenido de fragmentos finos a medida que aumenta la profundidad. El análisis se realizó con las muestras utilizadas para determinar conductividad hidráulica, haciendo submuestras cada 5 cm. Se grafican medias de $n=4$.

Por otra parte, la falta de poros de tamaño medio explicaría por si sola la baja retención de agua disponible para las plantas, pues son precisamente estos espacios los encargados de almacenar el agua que puede ser extraída por las especies vegetales (Rodríguez-Fuentes y Rodríguez-Absi 2002; Lal y Shukla 2004).

Así, dentro de las unidades experimentales, tenemos un sustrato donde se combinan dos características adversas para los cultivos, por un lado el alto contenido de arcillas retiene el agua con gran fuerza impidiendo la absorción por parte de las raíces (Hillel 1998; Lal y Shukla 2004), y por otra parte, la ausencia de poros medios disminuye considerablemente la capacidad de almacenamiento de agua que pudiera ser aprovechado sin problema por las plantas (Lal y Shukla, 2004). Según lo que se puede apreciar en la figura 11, ninguno de los tratamientos empleados, ni el tiempo de experimentación, fueron suficientes para alterar favorablemente estos parámetros.

Lo anterior, coincide con las observaciones de Prat y colaboradores (2003), quienes no encontraron modificaciones en los parámetros hídricos (curva de retención de humedad), en tepetates con cuatro años de cultivo, con respecto al tepetate inalterado. Ya que no se encontraron datos sobre trabajos similares, aún se desconoce cuanto tiempo de experimentación se requiere, para modificar la retención de humedad del tepetate, en condiciones de invernadero.

Aunque no se observaron cambios en la CC, el PMP y el AD, esto no implica, necesariamente, que éstos parámetros sean inadecuados para registrar modificaciones en las características físicas del tepetate, pues en este trabajo sólo se evaluaron desde los 5, y hasta los 10 cm de profundidad, por lo tanto, habría que evaluar el perfil completo (a intervalos de profundidad regulares), antes de descartar por completo a la CC, el PMP y el AD, como indicadores de mejoramiento para tepetate.

Clases de Tamaño de Partícula (CTP)

La tabla 6 contiene los resultados de las evaluaciones de las clases de tamaño de partícula, se incluye el promedio del diámetro de las cuatro repeticiones de cada tratamiento con su respectivo error estándar. Sólo se perciben diferencias significativas en algunas fracciones (5 a 10, 1 a 2, 0.25 a 1 y <0.25 mm), al comparar el material inalterado (testigo T0), contra el resto de los tratamientos, lo cual sugiere que el factor que determinó el comportamiento de este parámetro fue el riego.

Tabla 6. Porcentaje promedio del diámetro de partículas

Tratamiento	-----mm-----					
	>10	5 a 10	2 a 5	1 a 2	0.25 a 1	<0.25
T 0	0.0 ±0.0 c	61.1 ±2.0 a	33.0 ±1.0 a	2.7 ±0.6 b	1.6 ±0.5 c	1.6 ±0.2 b
TAB	1.8 ±0.3bc	46.3 ±2.5 b	33.7 ±1.1 a	7.3 ±0.8 a	6.2 ±0.6ab	4.7 ±0.3 a
TDB	2.5 ±0.5ab	47.8 ±2.0 b	31.3 ±0.5 a	7.1 ±0.9 a	6.8 ±1.0 a	4.5 ±0.5 a
TDA	2.6 ±0.6ab	45.5 ±1.9 b	31.9 ±1.0 a	7.8 ±0.5 a	7.4 ±0.4 a	4.7 ±0.3 a
TE	1.9 ±0.4bc	49.3 ±1.4 b	33.1 ±1.4 a	6.1 ±0.2 a	5.2 ±0.2ab	4.3 ±0.3 a
TEDB	2.2 ±0.2bc	50.3 ±1.5 b	31.1 ±0.6 a	6.1 ±0.3 a	6.3 ±0.3ab	4.0 ±0.6 a
TEDA	2.9 ±0.5ab	45.9 ±1.8 b	33.6 ±1.3 a	7.0 ±0.3 a	6.4 ±0.2bc	4.2 ±0.2 a
P	2.9 ±0.2ab	52.2 ±1.1 b	32.1 ±1.0 a	5.4 ±0.2 a	3.9 ±0.3ab	3.4 ±0.3ab
PDB	3.5 ±0.5ab	48.9 ±3.0 b	32.5 ±1.3 a	6.3 ±0.8 a	5.1 ±0.6ab	3.8 ±0.6 a
PDA	4.6 ±0.8 a	42.4 ±1.5 b	34.4 ±1.8 a	8.2 ±0.4ab	6.4 ±0.7ab	3.9 ±0.3 a
PE	2.9 ±0.3ab	46.8 ±1.7 b	35.2 ±1.3 a	6.5 ±0.4 a	5.0 ±0.4ab	3.6 ±0.2ab
PEDB	3.5 ±0.4ab	49.0 ±2.4 b	31.1 ±0.7 a	6.2 ±0.7 a	5.9 ±0.8ab	4.3 ±0.6 a
PEDA	3.7 ±0.7ab	45.6 ±2.3 b	33.8 ±1.6 a	7.0 ±0.4 a	6.0 ±0.4ab	3.9 ±0.4 a

Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=4$; con su respectivo error estándar y donde: T0: Material original, roturado y tamizado, pero sin enmiendas, planta, ni riego, TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

La conducta general de los tratamientos, y las diferencias con respecto al testigo T0, se ilustran mejor en la figura 13.

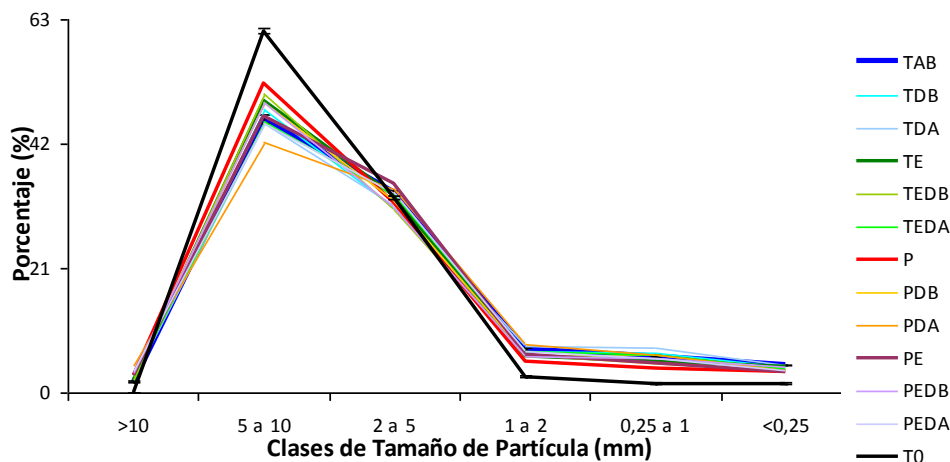


Figura 13. Distribución porcentual de las clases de tamaño de partícula (CTP). Los tratamientos se comportan de manera muy similar, pero difieren considerablemente del material inalterado (T0), resalta un aumento en CTP menores a 2mm y la aparición de CTP mayores a 10mm. Se grafican medias de n=4. Donde: T0: Material original, roturado y tamizado, pero sin enmiendas, planta, ni riego, TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PED: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

Al observar la tabla 6 y la figura 12, en todos los casos, es notorio el predominio de la fracción 5 a 10mm (alrededor de 47%), seguida de la fracción 2 a 5mm (cerca de 32%). Lo cual es comprensible, tomando en cuenta que las condiciones iniciales del experimento implicaron tamizar el tepetate para utilizar únicamente las fracciones comprendidas entre los 2 y los 10mm. Para el testigo T0 éste intervalo abarca hasta el 94% del total de CTP del tepetate.

La aparición de CTP menores a 2mm dentro de los tratamientos, (tabla 6 y figura 13), apunta hacia una disgregación o disolución de los fragmentos mayores, en este caso, de la fracción 5 a 10mm, mientras que la fracción 2 a 5mm permanece sin cambios en ningún caso. Prat y colaboradores (2003), consideran que para tepetates, las partículas dentro del diámetro de 2 a 4.8mm son las más estables y resistentes a la erosión, lo cual explicaría por qué estos no sufrieron disminución en su número.

Esta disgregación también ha sido observada en otros trabajos con tepetate en condiciones y tiempos de experimentación similares a las que probamos (Acevedo *et al.*, 2001; Velázquez *et al.*, 2001; García *et al.*, 2008; Avilés 2013). Aunque, en contraste con los resultados obtenidos por esos autores, en esta ocasión no hubo diferencias notables entre tratamientos, lo cual no necesariamente implica que la planta, el estiércol o el fertilizante no hayan influido sobre la disolución, simplemente; el efecto del riego por si solo resultó tan eficaz, que enmascara los efectos que el resto de los factores hayan podido producir.

Por otra parte, en los tratamientos, también se observó la aparición de CTP con diámetros mayores a 10mm que, aunque escasos, no estaban presentes al inicio del experimento y tampoco se encontraron en el testigo T0 (tabla 6 y figura 13).

Flores y colaboradores (2011), explican que estas fracciones gruesas tienen su origen en la disolución y posterior asociación de las partículas del tepetate, donde los ciclos de humedecimiento y secado asociados al riego serían los factores que promoverían dichos procesos (Velázquez *et al.*, 2001; Avilés 2013).

Así, la aparición de CTP menores a 2mm, está condicionada a la disolución que sufren los granos mayores durante el humedecimiento (riego); el agua, al ingresar entre las superficies de las partículas arcillosas las separa unas de otras (Kemper y Rosenau 1986; Bhardwaj *et al.*, 2007).

Mientras tanto, la formación de CTP >10mm, puede tener lugar durante el secado; con la disminución progresiva de la humedad, la cohesión entre las partículas aumenta. Este aumento en la cohesión, se debe a que, con la pérdida de agua, el contacto entre granos se vuelve más estrecho, así mismo, la fuerza de tensión superficial de la película de agua restante en los poros de desagüe experimenta un incremento (Lal y Shukla 2004).

Aunque individualmente no se encontraron diferencias entre tratamientos (tabla 6), al agrupar a todos aquellos que consideraron el factor planta, para compararlos contra todos aquellos que no la incluyeron (excepto T0), si se encontraron diferencias que llegaron a ser significativas (tabla 7).

Tabla 7. Influencia de la planta sobre el diámetro promedio de las partículas

Tratamiento	-----mm-----					
	>10	5 a 10	2 a 5	1 a 2	0.25 a 1	<0.25
Sin planta	2.3±0.1 b	47.5±0.4 a	32.5±0.2 a	6.9±0.1 a	6.4±0.1 a	4.4±0.0 a
Con planta	3.5±0.1 a	47.5±0.7 a	33.2±0.3 a	6.6±0.2 a	5.4±0.2 b	3.8±0.1 b

Los valores expresan porcentajes. Tratamientos sin planta (TAB, TDB, TDA, TE, TEDB y TEDA); tratamientos con planta (P, PDB, PDA, PE, PEDB y PEDA). Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=24$, con su respectivo error estándar y donde: TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

En la tabla 7, los tratamientos con planta muestran un porcentaje de CTP >10mm estadísticamente distinto al que se encuentra en los tratamientos sin planta. Lo mismo se aprecia en las CTP <0.25mm y de 0.25 a 1. Cuando el material se secó como parte de la metodología utilizada para determinar este parámetro (Oades J. 1993, Báez *et al.*, 2007), los exudados de la planta, pudieron contribuir a la cementación de las partículas que conforman las fracciones menores, propiciando así el aumento de la fracción >10mm.

De acuerdo con los trabajos disponibles para consulta (Fechter y Flores 1997; Acevedo y Flores 1997; Velázquez y Flores 1997; Acevedo *et al.*, 2001; Velázquez *et al.*, 2001; Velazquez 2002; García *et al.*, 2008; Flores *et al.*, 2011; Avilés 2013), durante la habilitación de tepetates, tanto en invernadero, como en campo, es normal encontrar un predominio del proceso de dispersión de partículas, por encima de la asociación de las mismas. En otras palabras; es necesario separar las partículas que conforman al material original endurecido y masivo, para después obtener tamaños mayores de partícula, formados mediante la incorporación de materia orgánica durante la actividad biológica (Fechter y Flores 1997), obteniendo así agregados, o bien, por el reacomodo y empaquetamiento de las partículas, durante los ciclos de humedecimiento y secado (Denef *et al.*, 2001), en cuyo caso se obtienen fragmentos.

El manejo al que se somete el material durante la habilitación (frecuencia e intensidad de los ciclos de humectación y secado, métodos de labranza, abonado, especie vegetal cultivada), así como el grado de endurecimiento del tepetate utilizado, determinarán el momento en que los agregados comenzarán a formarse (un tepetate con

alto grado de endurecimiento es más resistente a la alteración) (Fechter y Flores 1997, Báez *et al.*, 2007, Báez *et al.*, 2010). Con el tiempo, en tepetates cultivados, la cantidad de agregados se incrementa, mientras la cantidad de fragmentos decae (Báez *et al.*, 2007).

Aunque la fracción >10mm encontrada en el presente estudio, tenga, muy probablemente, su origen en la consolidación de partículas por procesos de secado y humectación (Bhardwa *et al.*, 2007), no se descarta del todo la presencia de agregados reales, con base a la incipiente incorporación de materia orgánica (Flatch *et al.*, 1992).

De hecho, en los tratamientos que contemplaron la adición de estiércol, visualmente se detectaron la presencia de varios “terrones” compuestos por pequeños fragmentos de tepetate y materia orgánica, tan débilmente estructurados, que colapsaban con un mínimo esfuerzo por lo que no pudieron ser contabilizados.

En síntesis; el riego fue el principal promotor de cambios en los diámetros de las CTP, en los tratamientos. Propició la aparición de fracciones menores a 2 y mayores a 10mm. Mientras, el factor más influyente sobre las CTP fue la planta, la cual incremento la fracción >10mm y disminuyó las fracciones menores a 1mm.

Estabilidad de las Clases de Tamaño de Partícula (ECTP)

En la tabla 8 se muestran los resultados de estabilidad de las clases de tamaño de partícula, se incluye el promedio del diámetro de la ECTP de las cuatro repeticiones, de cada tratamiento con su respectivo error estándar.

Tabla 8. Porcentaje promedio de estabilidad en húmedo de las clases de tamaño de partícula

Tratamiento	-----mm-----						
	>5	3 a 5	2 a 3	1 a 2	0.5 a 1	0.25 a 0.5	<0.25
T O	17.5 ±0.0b	4.2 ±0.0a	37.0 ±0.0a	10 ±0.0a	7.8 ±0.0a	5.5 ±0.0a	17.9 ±0.1a
TAB	47.1 ±1.0a	5.8 ±0.1a	23.2 ±0.2b	6.3 ±0.2a	4.9 ±0.2a	2.4 ±0.1a	10.3 ±0.3ab
TDB	46.3 ±0.8a	5.7 ±0.2a	20.9 ±0.3b	6.4 ±0.2a	5.6 ±0.2a	3.5 ±0.3a	11.5 ±0.3ab
TDA	44.5 ±0.4a	6.1 ±0.1a	20.6 ±0.1b	6.8 ±0.1a	6.1 ±0.2a	4.5 ±0.2a	11.4 ±0.1ab
TE	50.7 ±0.8a	5.7 ±0.2a	21.5 ±0.6b	5.6 ±0.1a	4.5 ±0.1a	3.2 ±0.2a	8.8 ±0.3b
TEDB	49.9 ±0.7a	6.3 ±0.1a	21.1 ±0.1b	5.0 ±0.2a	4.1 ±0.3a	3.6 ±0.3a	10 ±0.4ab
TEDA	48.4 ±0.7a	5.9 ±0.2a	21.3 ±0.4b	5.5 ±0.1a	5.1 ±0.1a	2.8 ±0.1a	11 ±0.4ab
P	53.4 ±1.0a	5.3 ±0.1a	20.6 ±0.5b	5.7 ±0.3a	3.7 ±0.2a	2.4 ±0.1a	8.8 ±0.2b
PDB	48.6 ±1.0a	5.5 ±0.1a	19.3 ±0.5b	6.6 ±0.2a	5.7 ±0.2a	4.5 ±0.3a	9.8 ±0.4ab
PDA	41.2 ±0.1a	5.6 ±0.1a	23.5 ±0.5b	8.1 ±0.1a	6.6 ±0.1a	4.1 ±0.2a	10.7 ±0.1ab
PE	48.2 ±1.0a	5.8 ±0.1a	24.0 ±0.7b	5.8 ±0.2a	4.5 ±0.2a	3.1 ±0.1a	8.6 ±0.3b
PEDB	48.7 ±0.7a	6.6 ±0.1a	20.8 ±0.2b	6.1 ±0.2a	4.8 ±0.3a	4.0 ±0.4a	9.1 ±0.2b
PEDA	45.8 ±0.4a	6.3 ±0.1a	22.6 ±0.5b	6.6 ±0.1a	5.2 ±0.1a	4.8 ±0.2a	8.8 ±0.2b

Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=4$; con su respectivo error estándar y donde: T0: Material original, roturado y tamizado, pero sin enmiendas, planta, ni riego, TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

Tanto en la tabla 8, como en la figura 14, destaca el hecho de que para todos los tratamientos, las CTP más estables corresponden a la fracción mayor a 5mm, mientras que las menos estables pertenecen a la fracción 0.25 a 0.5mm.

Por otra parte, para el testigo inalterado T0, la fracción más abundante, resultó la de 2 a 3mm, mientras que la fracción >5mm se vio drásticamente disminuida en comparación al resto.

En otros trabajos se observó el dominio de la fracción >5mm dentro de los tratamientos (Acevedo *et al.*, 2001; Velázquez 2002; García *et al.*, 2009; Flores *et al.*, 2011; Avilés 2013). Allí, se atribuye la estabilidad de esa fracción a la consolidación y cementación de los fragmentos de tepetate (Flores *et al.*, 2011).

Se recalca que al inicio del experimento, el tepetate se roturó y tamizó para utilizar únicamente la fracción comprendida entre los 2 y los 10mm, por tanto, es razonable que la mayor parte de las CTP se encuentren en este rango de tamaño.

De acuerdo a las observaciones anteriores, no se encontraron diferencias en la estabilidad de las CTP entre tratamientos, sin embargo, si existe contraste con la estabilidad evaluada en el material inalterado (T0), donde las CTP con diámetro >5mm resultan bastante inestables y escasos, mientras que las fracciones de 2 a 3mm y <0.25mm son más abundantes que en los tratamientos, lo cual se resalta en la figura 14.

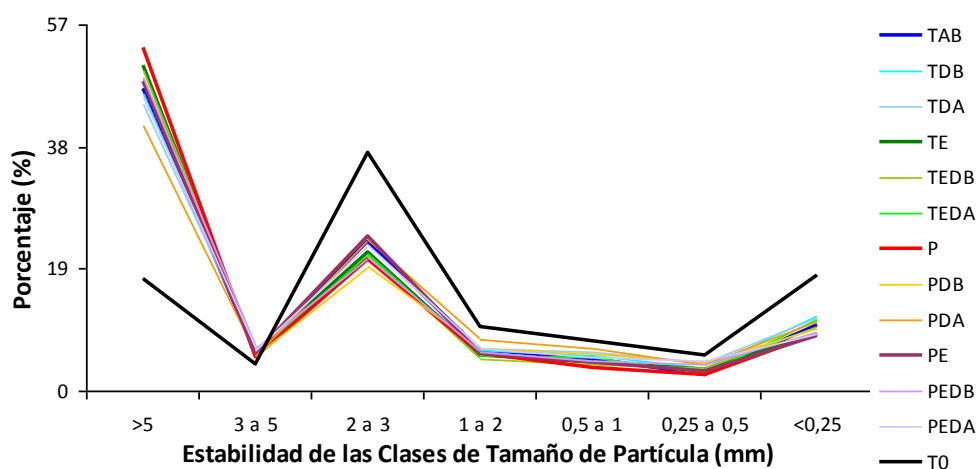


Figura 14. Distribución porcentual de las clases de tamaño de partícula estables. La estabilidad de las CTP presentes en T0 es considerablemente distinta a la de los tratamientos en las fracciones >5, 2 a 3 y <0.25mm. Se grafican medias de n=4. Donde: T0: Material original, roturado y tamizado, pero sin enmiendas, planta, ni riego, TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

Para el testigo T0, el aumento tan considerable de las fracciones <0.25 y 2 a 3mm, puede ser atribuida a la disolución de la fracción >5mm. Esta dispersión habría ocurrido durante la misma determinación de la estabilidad de las CTP pues al humedecer el tepetate el aire atrapado dentro de los fragmentos de tepetate, ejerce una presión interna que provoca su desintegración (Barthés y Roose 2002), es conveniente recordar que, hasta ese momento, el material contenido en T0 no había tenido contacto con agua. Por lo regular, el material que se disgrega en las diferentes fracciones, se acumula precisamente en la de diámetro <0.25 mm (Acevedo *et al.*, 2001; García *et al.*, 2008).

Ya que la fracción >5mm resulta estable en los tratamientos, y en cambio, es tan fácil de dispersar en el testigo T0, el aumento en la magnitud de las fuerzas que mantienen unidas las CTP, es atribuible a las condiciones experimentales a las que estuvieron sometidos los tratamientos. Dicho de otra manera; las condiciones experimentales favorecieron el aumento de la estabilidad de las CTP con diámetro >5mm.

Este aumento en la estabilidad muy probablemente tenga su origen en los ciclos de humectación y desecación, tal como se propuso anteriormente al analizar el parámetro de Clases de Tamaño de Partícula. Donde las partículas disgregadas durante los periodos de humedecimiento, se reacomodan y empaquetan durante la desecación, aumentando así la cohesión entre ellas (Denef *et al.*, 2001).

Otro proceso que posiblemente influyó en la estabilidad de las CTP es la recementación del tepetate, lo cual ocurriría mediante la precipitación de películas de sílice durante los ciclos de humedecimiento y secado (Flatch *et al.*, 1992; Avilés 2013). Flatch y colaboradores (1992), describen que cuando el tepetate se encuentra húmedo, el sílice hidratado se encuentra adsorbido en la superficie de las arcillas, sin embargo, cuando el tepetate se seca, el sílice precipita como óxido de silicio entre las superficies de los minerales y partículas del suelo. Así, la sucesión de ciclos de humedecimiento y secado, provoca un aumento progresivo de las películas de óxido de silicio, lo cual puede llevar a la cementación de partículas y al incremento de su estabilidad (Flatch *et al.*, 1992; Avilés 2013).

La hipótesis de que los eventos de humectación y secado, hayan sido los responsables de las afectaciones a la estabilidad de las CTP, se basa en que el riego fue el único elemento distinto entre los tratamientos y el testigo T0.

Por otra parte, ya que no se encontraron diferencias entre tratamientos, se analizaron individualmente los efectos de los factores planta, estiércol y fertilizante, sin incluir a T0, (tablas 9, 10 y 11 respectivamente), sin embargo, ninguno de ellos parecen haber causado, por si mismos, un impacto lo suficientemente grande como para marcar diferencias notables, ni tendencias definidas. Esto, no implica necesariamente, que esos factores no hayan ejercido influencia en la estabilidad de las CTP, si no que, probablemente,

los procesos de humectación y desecación, o incluso, la re-cementación del tepetate fueron más decisivos sobre el comportamiento de la estabilidad de las CTP.

Tabla 9. Influencia de la planta sobre la estabilidad de las Clases de Tamaño de Partícula

Tratamiento	-----mm-----						
	>5	3 a 5	2 a 3	1 a 2	0.5 a 1	0.25 a 0.5	<0.25
Sin planta	48 ±1.0 a	6 ±0.2 a	21 ±0.5 a	6 ±0.2 a	5 ±0.3 a	3 ±0.3 a	11 ±0.5 a
Con planta	48 ±1.3 a	6 ±0.2 a	22 ±0.7 a	7 ±0.3 a	5 ±0.3 a	4 ±0.4 a	9 ±0.3 b

Tratamientos sin planta (TAB, TDB, TDA, TE, TEDB y TEDA); tratamientos con planta (P, PDB, PDA, PE, PEDB y PEDA). Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=24$; con su respectivo error estándar y donde: TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

Tabla 10. Influencia del estiércol sobre la estabilidad de las Clases de Tamaño de Partícula

Tratamiento	-----mm-----						
	>5	3 a 5	2 a 3	1 a 2	0.5 a 1	0.25 a 0.5	<0.25
Sin estiércol	47 ±1.3a	6 ±0.2 a	21 ±0.6 a	7 ±0.3 a	5 ±0.3 a	4 ±0.3 a	10 ±0.4a
Con estiércol	49 ±1.0a	6 ±0.2 a	22 ±0.6 a	6 ±0.2 b	5 ±0.3 a	4 ±0.4 a	9 ±0.4 a

Tratamientos sin estiércol (TAB, TDB, TDA, P, PDB y PDA); tratamientos con estiércol (TE, TEDB, TEDA, PE, PEDB y PEDA). Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=24$; con su respectivo error estándar y donde: TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

Tabla 11. Influencia del fertilizante sobre la estabilidad de las Clases de Tamaño de Partícula

Tratamiento	-----mm-----						
	>5	3 a 5	2 a 3	1 a 2	0.5 a 1	0.25 a 0.5	<0.25
Sin fertilizante	50 ±1.6 a	6 ±0.2 a	22 ±0.9 a	6 ±0.3 a	4 ±0.3 b	3 ±0.2 a	9 ±0.5 a
Dosis baja	48 ±1.3 ab	6 ±0.2 a	21 ±0.5 a	6 ±0.4 a	5 ±0.4 ab	4 ±0.5 a	10 ±0.6 a
Dosis alta	45 ±1.0 b	6 ±0.2 a	22 ±0.7 a	7 ±0.3 a	6 ±0.3 a	4 ±0.4 a	10 ±0.5 a

Tratamientos sin fertilizante (TAB, TE, P y PE); tratamientos con dosis baja de fertilizante (TDB, TEDB, PDB y PEDB); tratamientos con dosis alta de fertilizante (TDA, TEDA, PDA y PEDA). Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=16$; con su respectivo error estándar y donde: TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

Otro punto a destacar, es la similitud entre los resultados obtenidos del análisis de Clases de Tamaño de Partícula (tabla 6), y el análisis de Estabilidad de las Clases de Tamaño de Partícula (tabla 8), en ambos, se observaron comportamientos semejantes en la

distribución del diámetro de las CTP (excepto en T0), para cada una de las fracciones correspondientes (tablas 6 y 8). Lo cual indica una alta estabilidad de las CTP que, puede ser atribuida a la consolidación natural del tepetate, y a los procesos que, posteriormente, sufrió el material bajo las condiciones experimentales en invernadero.

En la figura 15 se comparan los diámetros de las partículas obtenidos en la prueba de Clases de Tamaño de Partícula, contra los obtenidos en la prueba de Estabilidad de las Clases de Tamaño de Partícula, para el testigo absoluto (TAB) y para el testigo T0. Donde TAB representa la conducta general (bastante estable), de todos los tratamientos, mientras que T0 es el único que muestra diferencias notables entre los datos de CTP y estabilidad de CTP. Al parecer, la ausencia de riego en T0 fue determinante para que este presentara una estabilidad tan baja.

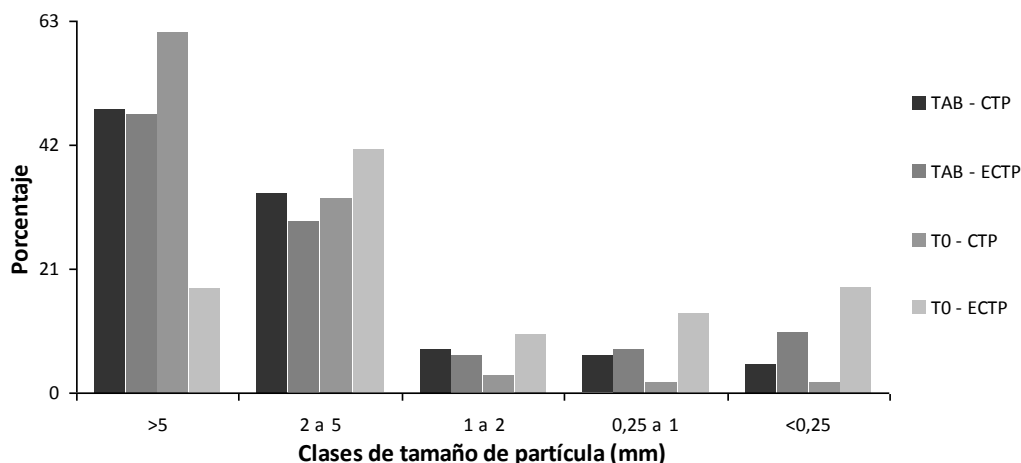


Figura 15. Comparación del diámetro de las CTP obtenidas de las pruebas de Clases de Tamaño de Partículas y Estabilidad de Clases de Tamaño de Partículas, para TAB y T0. TAB representa el comportamiento general de todos los tratamientos, sólo en T0 se encontraron diferencias notables entre los resultados de CTP y estabilidad de CTP. Donde: ECTP: Estabilidad de las clases de tamaño de partículas, CTP: Clases de tamaño de partículas, T0: Material original, roturado y tamizado, pero sin enmiendas, planta, ni riego, TAB: testigo absoluto.

Báez y colaboradores (2007), describen a la prueba de Estabilidad de Agregados (utilizada aquí para determinar la estabilidad de las clases de tamaño de partícula), como una simulación de las fuerzas disgregantes que, al mismo tiempo, permite cuantificar la cantidad de agregados resistentes a dichas fuerzas. Además, en ese mismo trabajo, proponen que el manejo al que se someten los tepetates, influye de manera determinante en el grado de estabilidad que pueden desarrollar tanto los agregados, como los fragmentos

presentes. Dentro de las formas de manejo que estos autores analizaron, describen que el tepetate usado como cama de siembra en invernadero, desarrolló una mejor estabilidad comparada con el tepetate recién roturado, esos resultados coinciden con lo presentado en la figura 15, donde, T0 simboliza la resistencia intrínseca del tepetate a la dispersión (tal como el tepetate recién roturado analizado por Báez y colaboradores 2007), mientras que los resultados de TAB se refieren a la estabilidad desarrollada gracias al manejo al que se sometió el tepetate.

Haulon y colaboradores (2007), también observaron menor estabilidad en el tepetate recién roturado, además, hacen hincapié en que el tiempo de manejo afecta considerablemente la estabilidad, argumentando que mientras más tiempo pase bajo un manejo adecuado más alta será la estabilidad.

En términos generales, todos los tratamientos resultaron igualmente efectivos para incrementar la estabilidad de las CTP, con respecto al material original. Donde el riego fue el factor determinante para promover dicho aumento.

b) Características Químicas

En la tabla 12 se muestran los resultados de las determinaciones de varios parámetros químicos. Se incluye el promedio de las cuatro repeticiones de cada tratamiento con su respectivo error estándar.

Tabla 12. Características Químicas del Tepetate

Tratamiento	pH (1:2.5)		Materia Orgánica (%)	CIC -----	Ca ²⁺ -----	Mg ²⁺ Cmol ⁺ kg ⁻	Na ⁺ -----	K ⁺ -----
	agua	CaCl ₂ (0.01M)						
T0	6.9±0.2abc	5.7±0.1b	0.10±0.02b	19.4 ±0.1bcd	11.8 ±0.3a	7.3 ±0.4a	0.8 ±0.0g	2.4 ±0.1cd
TAB	7.2±0.1ab	5.7±0.0b	0.10±0.02b	19.1 ±0.1bcd	10.9 ±0.2a	9.7 ±0.3a	1.8 ±0.2cdef	2.5 ±0.0cd
TDB	7.0±0.1abc	5.5±0.1b	0.14±0.00b	19.7 ±0.1bcd	11.3 ±0.2a	9.5 ±0.2a	1.5 ±0.2f	2.0 ±0.1e
TDA	6.9±0.1abc	5.1±0.0bc	0.10±0.02b	18.9 ±0.1cd	12.1 ±0.6a	7.9 ±0.6a	1.4 ±0.2f	1.9 ±0.1e
TE	7.4±0.1a	6.9±0.0a	0.76±0.08a	23.2 ±0.2a	13.9 ±0.2a	11.2 ±0.1a	2.4 ±0.1ab	4.4 ±0.1ab
TEDB	7.3±0.1ab	6.8±0.0a	1.04±0.01a	23.4 ±0.0a	12.8 ±0.3a	11.7 ±0.2a	2.4 ±0.1abc	4.5 ±0.1ab
TEDA	7.3±0.1ab	6.9±0.0a	0.63±0.12a	21.7 ±0.1ab	12.9 ±0.7a	11.2 ±0.6a	2.3 ±0.1abcd	4.6 ±0.1a
P	6.6±0.1c	5.2±0.2bc	0.11±0.04b	19.0 ±0.3cd	9.5 ±0.5a	9.3 ±0.6a	2.2 ±0.1bcde	2.5 ±0.1c
PDB	6.8±0.3bc	4.9±0.1c	0.17±0.03b	18.8 ±0.1d	11.8 ±0.5a	7.6 ±0.5a	1.8 ±0.1def	2.0 ±0.1de
PDA	6.5±0.1c	4.8±0.2c	0.13±0.03b	18.5 ±0.2d	9.5 ±0.3a	9.1 ±0.3a	1.7 ±0.0ef	2.0 ±0.0de
PE	7.2±0.1ab	6.5±0.1a	0.97±0.05a	21.7 ±0.1ab	11.2 ±0.4a	9.9 ±0.2a	2.6 ±0.1ab	4.1 ±0.1b
PEDB	7.2±0.1ab	6.5±0.2a	0.78±0.02a	21.7 ±0.2ab	11.9 ±0.2a	10.9 ±0.1a	2.7 ±0.0 ab	4.2 ±0.1ab
PEDA	7.2±0.1ab	6.5±0.1a	0.93±0.06a	21.6 ±0.2abc	11.5 ±0.4a	10.6 ±0.5a	2.8 ±0.1a	4.3 ±0.1ab

Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=4$, con su respectivo error estándar; y donde: CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico; T0: Material original, roturado y tamizado, pero sin enmiendas, planta, ni riego, TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta. pH en agua y en CaCl₂ determinados con potenciómetro. Materia Orgánica por el método de Walkley y Black. CIC, Calcio y Magnesio, por volumetría con versenato. Sodio y Potasio evaluados por flamometría.

pH

En la figura 16 se comparan los resultados de pH determinados con agua y los obtenidos con CaCl_2 . Se observa una disminución de los valores al usar CaCl_2 , con respecto a los datos obtenidos con agua, lo cual se considera dentro de lo normal al utilizar esta metodología (Jackson M., 1970; Rodríguez-Fuentes y Rodríguez-Absi 2002).

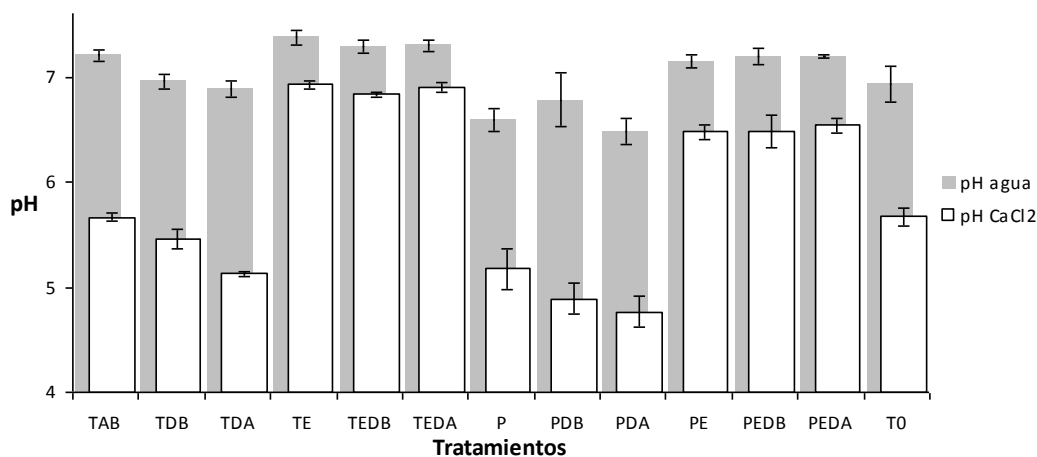


Figura 16. Comparación entre el pH obtenido con agua y el determinado con CaCl_2 . En ambos; los tratamientos con estiércol ofrecen menos variaciones y valores más cercanos a la neutralidad. La planta tiene un efecto acidificante. Las mayores variaciones entre tratamientos se observan entre aquellos a los que se les agregó materia orgánica y los que carecieron de esta enmienda. Se grafican medias de $n=4$. Las líneas de variabilidad representan el error estándar. Donde: T0: Material original, roturado y tamizado, pero sin enmiendas, planta, ni riego, TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

En estudios similares con tepetate proveniente de la misma zona, se han reportado valores de pH que van desde 6.6 hasta 8.3 (Herrera 2000; Díaz 2001; Muñiz 2006; Plancarte 2006; García et al., 2008; Flores et al., 2011; Avilés 2013). También se han hecho observaciones utilizando soluciones de CaCl_2 , en cuyo caso los valores de pH van de 5.1 a 8.2 (Herrera 2000; Díaz 2001; Plancarte 2006). Para este trabajo, la mayor parte de los valores de pH (determinados tanto en agua como en CaCl_2 , tabla 12), coincide con lo obtenido por estos autores.

Por lo anterior, el tepetate podría clasificarse desde; moderadamente ácido (pH 5.1 a 6.5), neutro (pH 6.6 a 7.3), hasta medianamente alcalino (pH 7.4 a 8.5), (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2002).

Según lo mostrado en la tabla 12, T0 no presenta diferencias significativas con ninguno de los tratamientos en cuanto al pH determinado en agua. Mientras que, con el pH determinado en CaCl_2 , T0 presenta similitud con TAB. Ya que la única diferencia entre TAB y T0 es la aplicación de riego (en el primero), se puede afirmar que el riego no jugó un papel determinante en cuanto a cambios en el pH.

En la tabla 12 y en la figura 16, destaca que, tanto en agua como en CaCl_2 , los tratamientos con estiércol presentan un pH más cercano a la neutralidad y con menos variaciones entre determinaciones. La planta y el fertilizante tienen un efecto acidificante. Lo anterior se observa mejor al analizar individualmente los efectos de cada factor; planta, estiércol y fertilizante, en las tablas 13, 14 y 15 respectivamente.

Tabla 13. Influencia de la planta sobre el pH

Tratamiento	agua	CaCl_2
Sin planta	7.2 \pm 0.0 a	6.2 \pm 0.2 a
Con planta	6.9 \pm 0.1 b	5.7 \pm 0.2 b

Tratamientos sin planta (TAB, TDB, TDA, TE, TEDB y TEDA); tratamientos con planta (P, PDB, PDA, PE, PEDB y PEDA). Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=24$, con su respectivo error estándar; y donde: TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

La disminución del pH, en los tratamientos que incluyen al factor planta (tabla 13), es parte de un fenómeno frecuente, pues las raíces producen CO_2 y ácidos orgánicos capaces de alterar las condiciones de óxido-reducción en el suelo (Aguirre A., 2006), la disminución en el pH deja disponibles a los nutrimentos y permite su asimilación por parte de las especies vegetales (Rodríguez-Fuentes y Rodríguez-Absi 2002; Bakhshandeh *et al.*, 2011). Una vez disponibles, la absorción de los cationes básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^2), también es causa de descensos en el pH (Youssef y Chino 1989).

En el caso de los agaves; estos se desarrollan en ambientes áridos y semiáridos, en condiciones de pH cercanos a la neutralidad o ligeramente alcalinos, 6.5 a 8, (Duran J., 2005; Pérez y Del Real, 2007). En tales condiciones, algunos nutrimentos como el fósforo, no se

encuentran asimilables, los agaves superan esta condición al acidificar el medio (Gobeille *et al.*, 2006; Bautista *et al.*, 2007).

En plantaciones de *Agave tequilana* también se observó la acidificación de suelos de origen volcánico, atribuida a la pérdida de bases, principalmente calcio y potasio, producto de la cosecha continua, sin que mediara una fertilización que restituyera los nutrimentos perdidos (Gobeille *et al.*, 2006).

Tabla 14. Influencia del estiércol sobre el pH

Tratamiento	agua	CaCl ₂
Sin estiércol	6.8 ±0.1 b	5.2 ±0.1 b
Con estiércol	7.3 ±0.0 a	6.7 ±0.0 a

Tratamientos sin estiércol (TAB, TDB, TDA, P, PDB y PDA); tratamientos con estiércol (TE, TEDB, TEDA, PE, PEDB y PEDA). Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=24$, con su respectivo error estándar; y donde: TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

Al contrario de lo que ocurre con la planta, el factor estiércol parece alcalinizar el medio (tabla 14), o en su defecto, estabilizarlo cercano a la neutralidad. Lo mismo observaron García y colaboradores (2008), así como Flores y colaboradores (2011), donde se atribuyó la elevación del pH a la aportación y retención de bases por parte de la materia orgánica que formaba parte de las enmiendas a prueba.

Si bien, la degradación de la materia orgánica tiende a acidificar el medio, por la producción de iones NO_3^{-1} (Aguirre A., 2006), en este caso; el estiércol de origen bovino utilizado, posee una relación C/N de 26.0 (Labrador 1996), por lo que se estima que el aporte de nitrógeno hasta el momento, no ha sido lo suficientemente alto, como para generar una caída en los valores de pH.

Tabla 15. Influencia del fertilizante sobre el pH

Tratamiento	agua	CaCl ₂
Sin fertilizante	7.1 ±0.1 a	6.1 ±0.2 a
Dosis baja	7.1 ±0.1 a	5.9 ±0.2 ab
Dosis alta	7.0 ±0.1 a	5.8 ±0.3 b

Tratamientos sin fertilizante (TAB, TE, P y PE); tratamientos con dosis baja de fertilizante (TDB, TEDB, PDB y PEDB); tratamientos con dosis alta de fertilizante (TDA, TEDA, PDA y PEDA). Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=16$, con su respectivo error estándar; y donde: TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

En cuanto al fertilizante químico, éste tiene un efecto acidificante (tabla 15), que se incrementa al aumentar la dosis de fertilización, lo mismo observó Avilés (2013). La acidificación tiene sus causas en la reacción ácida del fertilizante utilizado (sulfato de amonio), (Aguirre A., 2006).

En trabajos en campo, aunque inicialmente el tepetate presenta un pH muy cercano a la neutralidad (Prat *et al*, 2003), bajo diferentes formas de manejo, se ha detectado una disminución progresiva del pH a lo largo del tiempo (Baumann y Werner 1997; Etchevers y Brito 1997), lo cual ha sido atribuido a la lixiviación y toma de cationes por parte de las plantas (Etchevers y Brito 1997; Covalada *et al.*, 2009).

Para el presente trabajo, el decremento en los valores de pH, señala el establecimiento de una dinámica, donde las enmiendas (principalmente la planta), han comenzado a alterar las propiedades originales del tepetate. Estas alteraciones, (las cuales se describen más adelante), podrían estar encaminadas a mejorar la vocación agrícola del tepetate.

Materia Orgánica (MO)

En la tabla 12 se muestran los resultados de la evaluación de la concentración de materia orgánica en el tepetate. Como se aprecia en la figura 17, los tratamientos que incluyen al factor estiércol presentan diferencias con respecto a aquellos tratamientos donde no se adicionó, además, la presencia de plantas también propició cierto aumento de MO.

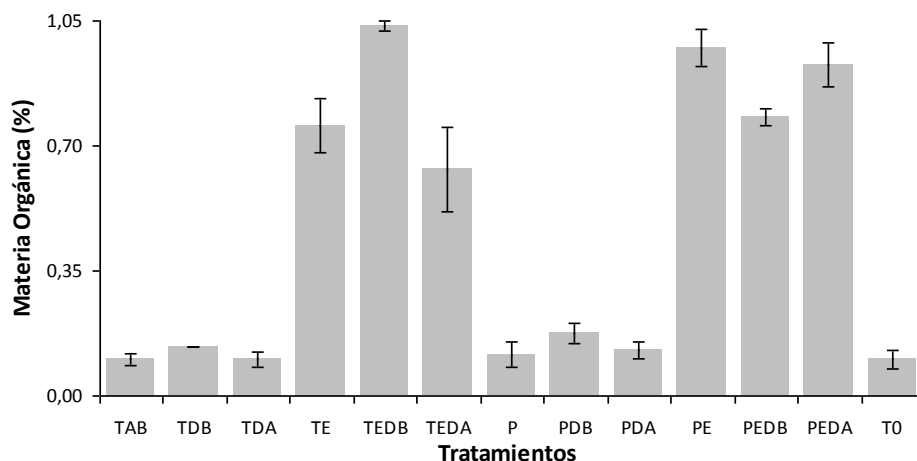


Figura 17. Contenido porcentual de materia orgánica. El testigo T0 sólo muestra diferencias con los tratamientos a los que se les adicionó estiércol. Se grafican medias de $n=4$. Las líneas de variabilidad representan el error estándar. Donde: T0: Material original, roturado y tamizado, pero sin enmiendas, planta, ni riego, TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

En los tratamientos sin estiércol (T0, TAB, TDB, TDA, P, PDB y PDA), el contenido de MO del tepetate coincide con los valores reportados en trabajos similares (García *et al.*, 2008; Flores *et al.*, 2011, Avilés 2013). En cambio, los tratamientos que si incluyeron estiércol (TE, TEDB, TEDA, PE, PEDB y PEDA), presentan una variación más amplia con respecto a esos mismos estudios, debido a que en cada uno de ellos se aplicaron distintas dosis de estiércol y a que el tiempo de experimentación también fue diferente.

Regularmente, la adición de enmiendas orgánicas es una manera rápida de aumentar el contenido de MO en el suelo (Báez *et al.*, 2002; Prat *et al.*, 2003), sin embargo, la incorporación de esta a la fracción mineral, depende del tiempo y el tipo de manejo al que el tepetate está sometido (Prat *et al.*, 2003; Haulon *et al.*, 2007; Covalada *et al.*, 2009), por ejemplo; en monocultivos de cereal en tepetate, el contenido de MO es muy pequeña,

pero ésta aumenta bajo un sistema de “labranza mínima” y puede llegar a compararse con tepetates cultivados durante más de cien años y que han recibido cantidades regulares de estiércol (Báez *et al.*, 2007).

En nuestro caso, los tratamientos con adición de estiércol incorporaron cantidades de materia orgánica mucho mayores, que aquellos donde no se adicionó la enmienda. Como puede apreciarse en la tabla 16, la cantidad total de carbono orgánico incorporado al tepetate, en los tratamientos con estiércol (TE, TEDB, TEDA, PE, PEDB y PEDA), es alrededor de 30 veces superior al resto de los tratamientos. También se aprecian cantidades destacables (hasta 1 %), de carbono, en los tratamientos con planta y sin estiércol (P, PDB, PDA), que sin embargo, no fueron lo suficientemente grandes como para marcar diferencias estadísticas significativas, en comparación con los tratamientos sin estiércol, ni planta (TAB, TDB, TDA).

Tabla 16. Carbono orgánico incorporado al tepetate bajo distintos tratamientos

Tratamiento	C (g)
TAB	0.16 ± 0.3 b
TDB	0.66 ± 0.0 b
TDA	0.65 ± 0.0 b
TE	22.01 ± 3.8 a
TEDB	26.77 ± 0.4 a
TEDA	18.36 ± 2.8 a
P	1.64 ± 0.7 b
PDB	1.64 ± 0.7 b
PDA	1.65 ± 0.0 a
PE	24.91 ± 1.5 a
PEDB	19.38 ± 0.7 a
PEDA	23.60 ± 2.5 a

La estimación de carbono incorporado se elaboró a partir del dato de M.O (tabla 12), para cada uno de los tratamientos. Al cual se sustrajo el contenido de inicio de M.O. del tepetate (0.1%, que corresponde al T0). Luego, ese dato se multiplicó por un factor de 1.724 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2002), y finalmente, se cambió la relación de porcentaje a gramos, considerando que en cada unidad experimental había 5kg de tepetate. Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=4$, con su respectivo error estándar; y donde: T0: Material original, roturado y tamizado, pero sin enmiendas, planta, ni riego, TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

Ahora bien, para conocer que tan alto fue el grado de integración del estiércol al tepetate, entre aquellos tratamientos que incluyeron esta enmienda (TE, TEDB, TEDA, PE, PEDB y PEDA); se calculó la cantidad de carbono orgánico, que se incorporó al tepetate, como una proporción del carbono adicionado (en forma de estiércol). Los resultados de este cálculo se muestran en la tabla 17, donde se puede apreciar que el porcentaje de integración de carbono varía desde 25.2 hasta 44.6% con respecto al carbono adicionado.

Tabla 17. Carbono incorporado como proporción del carbono añadido

Tratamiento	C (%)
TE	36.7 ± 6.4 a
TEDB	44.6 ± 0.7 a
TEDA	25.2 ± 5.7 a
PE	41.5 ± 2.5 a
PEDB	32.3 ± 1.2 a
PEDA	39.3 ± 4.1 a

El cálculo se llevó a cabo a partir de los datos de la tabla 16, transformando la cantidad en gramos allí expresada a una relación porcentual. Considerando que a cada unidad experimental se le agregó 120g de (materia seca de) estiércol. Es decir; que el carbono añadido a cada unidad experimental fue de 60g aproximadamente (tomando en cuenta que la mitad de la materia orgánica corresponde a carbono, según; Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007). Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=4$, con su respectivo error estándar; y donde: TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: tepetate estiércol y fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

Es decir, en catorce meses, en condiciones de invernadero, el tepetate incorporó en promedio 36.6% del carbono adicionado (en forma de estiércol). Lo cual, hace de las condiciones de experimentación propuestas, una forma de uso eficaz para que el tepetate aumente rápidamente su contenido de material orgánico.

Al respecto, Báez y colaboradores (2002 y 2007), coinciden con ésta afirmación, pues ellos aseguran que la mejor forma de manejo para incrementar el contenido de MO en un tepetate, es utilizarlo como sustrato de invernadero, bajo riego constante, pues las condiciones de temperatura y humedad favorecen la acumulación de carbono; con respecto a otras formas de manejo (dentro de las que se incluyen la “labranza mínima”).

Con respecto al factor planta; al agrupar a todos los tratamientos sin agave (excluyendo a T0), para compararlos contra los tratamientos que si lo contuvieron, no se observaron diferencias estadísticamente significativas (tabla 18). Aún así, se puede señalar

un pequeño incremento de materia orgánica, ocasionado a la presencia de la planta. La reducción en el pH de los tratamientos con agave (tabla 13), sugiere que al menos parte del carbón añadido por la planta forma parte de ácidos orgánicos. Lo anterior coincide con los resultados de García y colaboradores (2008), donde la planta (higuera), favoreció el aumento de carbón orgánico en el tepetate.

Tabla 18. Influencia de la planta sobre la materia orgánica

Tratamiento	M.O. (%)
Sin planta	0.46 ±0.08 a
Con planta	0.52 ±0.08 a

Tratamientos sin planta (TAB, TDB, TDA, TE, TEDB y TEDA); tratamientos con planta (P, PDB, PDA, PE, PEDB y PEDDA). No se observan diferencias estadísticas entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=24$, con su respectivo error estándar. Donde: TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

El fertilizante no jugó un papel determinante en este parámetro, lo cual es evidente en la tabla 19, donde se agrupan los tratamientos sin fertilizante (excluyendo a T0), y se comparan con los que si lo tuvieron en dosis baja y alta.

Tabla 19. Influencia del fertilizante sobre la materia orgánica

Tratamiento	M.O. (%)
Sin fertilizante	0.49 ±0.11 a
dosis baja	0.53 ±0.10 a
dosis alta	0.45 ±0.10 a

Tratamientos sin fertilizante (TAB, TE, P y PE); tratamientos con dosis baja de fertilizante (TDB, TEDB, PDB y PEDB); tratamientos con dosis alta de fertilizante (TDA, TEDA, PDA y PEDDA). No se observan diferencias estadísticas entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=16$, con su respectivo error estándar. Donde: TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

Algo similar observaron Báez y colaboradores (2002), al examinar algunas parcelas con tepetate que habían estado bajo cultivo de cereales y labranza convencional durante varias décadas, donde el uso de fertilizantes orgánicos e inorgánicos no mostraron incrementos significativos en el contenido de carbono orgánico, excepto durante los primeros años de aplicación. El hecho de que la materia orgánica no siguiera incremento su concentración, era atribuido a la oxidación del carbono y la pérdida de éste en forma de CO₂. En ese mismo estudio, Báez y colaboradores describen que en parcelas bajo un manejo que consideraba “labranza mínima”, se encontró hasta el doble de acumulación de materia orgánica con el uso de los mismos fertilizantes orgánicos e inorgánicos. Y concluyen que; bajo cualquier forma de manejo, la acumulación de carbono en el tepetate, continúa sólo hasta alcanzar un equilibrio entre acumulación y pérdidas (Báez *et al.*, 2010), aún cuando la adición de fertilizantes sea constante.

De acuerdo a lo anterior, aún cuando el contenido de materia orgánica en todos los tratamientos calificó como; “muy bajo” (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2002), sería posible incrementar la concentración de MO (con nuevas adiciones de estiércol), tanto como lo permita el equilibrio entre acumulación y pérdidas bajo las condiciones experimentales propuestas (en invernadero, con y sin agave, con distintas dosis de fertilizante inorgánico). Para determinar en qué momento se alcanza dicho equilibrio, se requeriría prolongar el tiempo de experimentación, suministrar nuevas dosis de fertilizante y estiércol, así como llevar a cabo un monitoreo del contenido de MO a intervalos de tiempo regulares.

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

En la tabla 12 se muestran los datos de las determinaciones de la capacidad de intercambio catiónico. Como se aprecia en la figura 18, los tratamientos con estiércol presentan diferencias con respecto a aquellos donde no se adicionó esta enmienda, además, los tratamientos con agave muestran cierta disminución de la CIC. El testigo T0 posee una CIC muy similar a la de los tratamientos sin estiércol. Aunque los comportamientos señalados son evidentes, esto no necesariamente se refleja en los resultados de la prueba estadística (tabla 12), donde prácticamente sólo resultan diferentes los tratamientos de tepetate y planta con estiércol (TE, TEDB, TEDA, PE, PEDB Y PEDA), de los tratamientos con planta (P, PDB Y PDA), mientras que el tepetate con y sin fertilizante (TAB, TDB y TDA), así como el testigo T0, no muestran diferencias con el resto de los tratamientos.

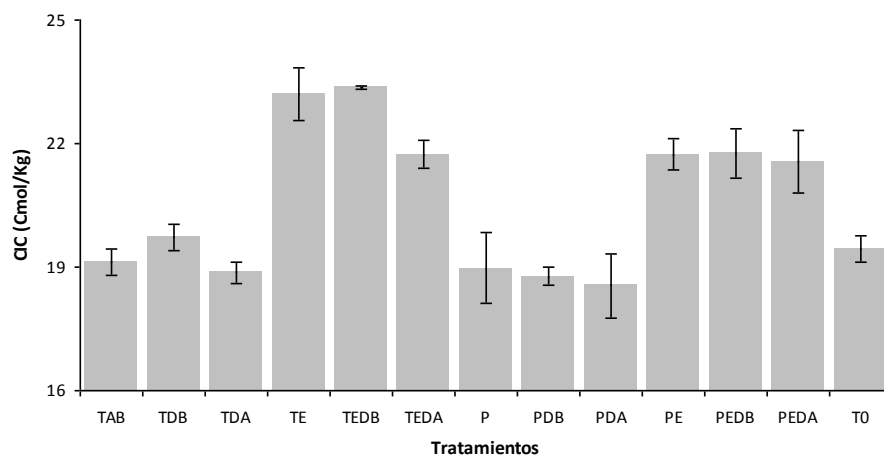


Figura 18. Capacidad de Intercambio Catiónico. El testigo T0 se comporta de manera similar a los tratamientos sin estiércol. Por otro lado, los tratamientos con estiércol presentan valores más altos. La presencia de agave promueve la disminución de la CIC. Se grafican medias de $n=4$. Las líneas de variabilidad representan el error estándar. Donde: T0: Material original, roturado y tamizado, pero sin enmiendas, planta, ni riego, TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

El hecho de que el testigo T0 muestre una CIC tan próxima al tratamiento TAB (tabla 12), indica que el riego no influyó de ninguna manera sobre el complejo de cambio.

Se sabe que la CIC del tepetate va desde 19 hasta 40 $\text{Cmol}^+\text{kg}^{-1}$ (Etchevers *et al.*, 1992; García *et al.*, 2008; Flores *et al.*, 2011), incluso se tienen mediciones de 17 $\text{Cmol}^+\text{Kg}^{-1}$ (Acevedo *et al.*, 2001), por lo que nuestros resultados se encuentran dentro de lo reportado

en la literatura. El rango tan amplio en los valores de CIC puede atribuirse a la heterogeneidad del material, como por ejemplo; diferencias en la cantidad y tipos de arcillas presentes.

De la misma manera, en otros trabajos, se ha observado que la adición de estiércol y otras enmiendas orgánicas afectan la CIC de acuerdo con el tipo, la cantidad de enmienda añadida y al tiempo de experimentación (García *et al.*, 2008; Flores *et al.*, 2011). De entre las enmiendas orgánicas, la adición de estiércol resulta particularmente efectiva para aumentar la capacidad de intercambio en tepetates en proceso de habilitación (Pajares *et al.*, 2010).

En la tabla 20 se agruparon los tratamientos sin estiércol (excepto T0), para compararlos contra los tratamientos con estiércol. Entre ambos se observa una diferencia estadísticamente significativa, donde la materia orgánica aumentó la CIC. Lo cual es bastante natural considerando que la materia orgánica juega un papel altamente significativo en el intercambio de iones del suelo, al aportar sitios de intercambio activos, (Buckman y Brady 1985; Hillel D., 1998; Gobeille *et al.*, 2006).

Tabla 20. Influencia del estiércol sobre la CIC

Tratamiento	CIC (Cmol ⁺ Kg ⁻¹)
Sin estiércol	19.0 ±0.1 b
Con estiércol	22.2 ±0.2 a

Tratamientos sin estiércol (TAB, TDB, TDA, P, PDB y PDA); tratamientos con estiércol (TE, TEDB, TEDA, PE, PEDB y PEDDA). Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de n=24, con su respectivo error estándar. Donde: TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

Por otra parte, el agave propició una reducción mínima (0.8 Cmol⁺Kg⁻¹), pero estadísticamente significativa de la CIC, lo cual puede apreciarse en la tabla 21, donde se han agrupado los tratamientos sin planta (excepto T0), para compararlos contra los tratamientos con planta. Esta disminución en la CIC podría relacionarse con la caída del pH (tablas 12 y 13), ocasionada por el mismo agave.

Cuando las raíces de los vegetales absorben cationes del suelo, liberan protones (H^+), estos protones promueven la acidificación de la solución del suelo y posteriormente se adhieren a los sitios de intercambio (Aguirre A., 2006), principalmente en los materiales amorfos y en la materia orgánica, lo cual conlleva a una disminución de la capacidad para intercambiar cationes, entre la solución y el complejo de cambio del suelo (Sparks D., 2003).

La CIC conferida por el estiércol también puede verse afectada por la disminución del pH de la solución del suelo, pues la materia orgánica (humificada), presenta carga variable – dependiente del pH (Sparks D., 2003).

Tabla 21. Influencia de la planta sobre la CIC

Tratamiento	CIC ($Cmol^+Kg^{-1}$)
Sin planta	21.0 \pm 0.4 a
Con planta	20.2 \pm 0.3 b

Tratamientos sin planta (TAB, TDB, TDA, TE, TEDB y TEDA); tratamientos con planta (P, PDB, PDA, PE, PEDB y PEDDA). Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=24$, con su respectivo error estándar. Donde: TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

En trabajos similares, también se observó un decremento de la CIC favorecido por el factor planta (olivo y tejocote, Herrera S., 2000; durazno, García A., 2001; pasto rhodes, Díaz J., 2001; higuera, Plancarte A., 2006; y girasol, Avilés C., 2013). En esos estudios se atribuyó la disminución de los sitios de intercambio a una probable microagregación de las partículas de menor tamaño, (arcillas). La reducción en el número de superficies reactivas también se explicó por la posible cementación de las partículas del tepetate, por acción de la sílice amorfa.

Aunque el fertilizante químico (específicamente el sulfato de amonio) también está considerado como fuente de protones y de hecho afectó ligeramente el pH; acidificándolo (tablas 12 y 15), su efecto no fue tan grande como para inducir diferencias estadísticamente significativas en la CIC, no obstante se aprecia una ligera disminución de este valor en la dosis más alta de fertilizante (tabla 22).

Tabla 22. Influencia del fertilizante sobre la CIC

Tratamiento	CIC (Cmol⁺Kg⁻¹)
Sin fertilizante	20.8 ±0.5 a
dosis baja	20.9 ±0.5 a
dosis alta	20.2 ±0.4 a

Tratamientos sin fertilizante (TAB, TE, P y PE); tratamientos con dosis baja de fertilizante (TDB, TEDB, PDB y PEDB); tratamientos con dosis alta de fertilizante (TDA, TEDA, PDA y (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2002)PEDA). No se observan diferencias estadísticas entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=16$, con su respectivo error estándar. Donde: TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

En síntesis, todos los tratamientos mostraron una CIC que puede ser clasificada como media (entre 15 a 25 Cmol⁺Kg⁻¹ según la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2002). Por lo tanto, bajo cualquiera de los tratamientos, el tepetate mantiene las aptitudes suficientes para almacenar y proporcionar nutrimentos para las plantas. No obstante, los valores más altos de CIC (21.6 a 23.4 Cmol⁺Kg⁻¹), se registraron en los tratamientos con estiércol (TE, TEDB, TEDA, PE, PEDB y PEDA), por lo que la adición de materia orgánica resulta una forma adecuada para incrementar las capacidades del tepetate para sostener un cultivo.

Bases Intercambiables (BI)

La tabla 12 engloba los resultados de las determinaciones de bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+).

Para calcio y magnesio no hubo diferencias estadísticas significativas en ningún caso, a pesar de que los tratamientos con estiércol (TE, TEDB, TEDA, PE, PEDB y PEDA), presentan cantidades ligeramente mayores de este par de bases (figura 19).

Al observar al testigo T0, y compararlo contra TAB, parece que el riego no influyó en cuanto al contenido de Ca^{2+} , pero si promovió un incremento mínimo de Mg^{2+} . Además, la presencia de agave propició cierta disminución en los niveles de ambas bases.

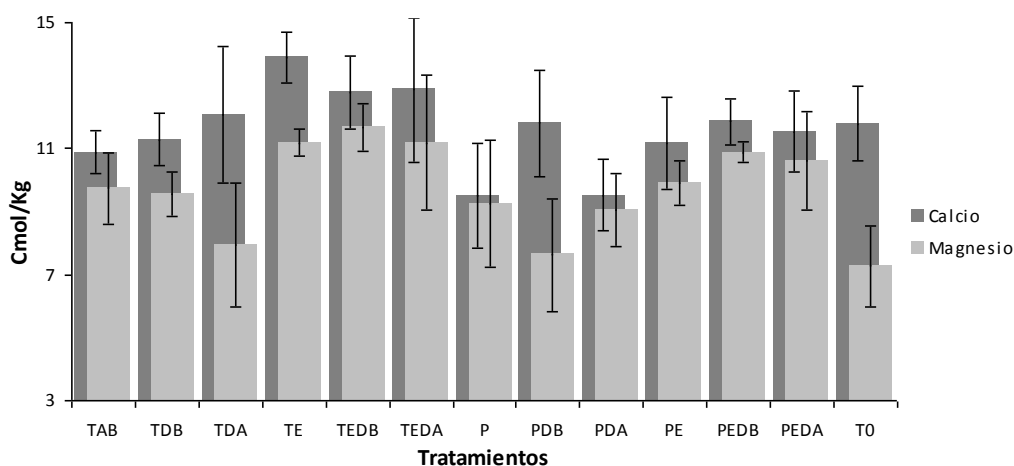


Figura 19. Bases Intercambiables (Ca^{2+} y Mg^{2+}). No se encontraron diferencias estadísticamente significativas, sin embargo pueden percibirse ligeros incrementos de ambos elementos en los tratamientos con estiércol. La presencia de agave promueve la disminución de estos nutrimentos. Se grafican medias de $n=4$. Las líneas de variabilidad representan el error estándar. Donde: T0: Material original, roturado y tamizado, pero sin enmiendas, planta, ni riego, TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

En cuanto al sodio y potasio, el estiércol aumentó el contenido de ambos elementos (figura 20), lo cual se ve reflejado en las diferencias estadísticas que presentan los tratamientos con esta enmienda (TE, TEDB, TEDA, PE, PEDB y PEDA), y los que no la contuvieron (T0, TAB, TDB, TDA, P, PDB y PDA), (tabla 12), dicha tendencia se encuentra especialmente acentuada en el caso del K^+ , donde los niveles alcanzaron hasta el doble para los tratamientos donde se añadió materia orgánica.

El agave promovió pequeñas diferencias, no significativas estadísticamente, entre tratamientos, donde el sodio aumentó en todas las unidades experimentales con planta (P, PDB, PDA, PE, PEDB y PEDA), mientras que, por otro lado, el potasio disminuyó de manera apenas perceptible en los tratamientos donde además de la planta, se incluyó estiércol (PE, PEDB y PEDA) (figura 20).

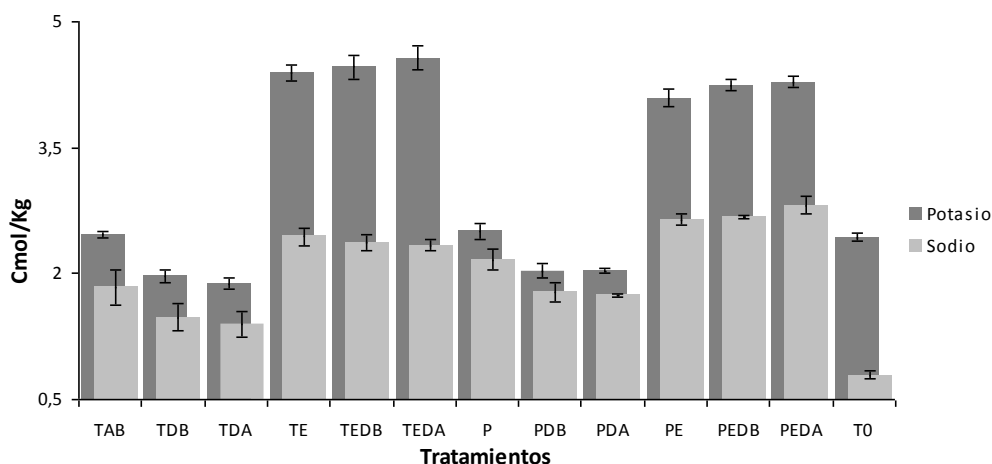


Figura 20. Bases Intercambiables (Na⁺ y K⁺). El estiércol promovió el aumento de ambos elementos, principalmente de potasio. El riego provocó un incremento drástico de sodio, no así de potasio. El agave promovió elevaciones mínimas en los niveles de Na⁺. Se grafican medias de n=4. Las líneas de variabilidad representan el error estándar. Donde: T0: Material original, roturado y tamizado, pero sin enmiendas, planta, ni riego, TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

Los valores reportados en la literatura, para calcio, magnesio, sodio y potasio intercambiable, en tepetates inalterados varían de 5 a 20 Cmol⁺kg⁻¹ para Ca⁺², de 3 a 13 Cmol⁺kg⁻¹ para Mg⁺², de 0.3 a 3 Cmol⁺kg⁻¹ para Na⁺ y de 0.2 a 2 Cmol⁺kg⁻¹ para K⁺, (Flores *et al.*, 1992, 1996 y 2011; Etchevers *et al.*, 1997; Velazquez *et al.*, 2001; Acevedo *et al.*, 2003), por lo que los resultados obtenidos coinciden con lo encontrado por estos autores, al menos para calcio, magnesio y sodio, sin embargo, en el caso del potasio, se obtuvieron estimaciones que en algunos tratamientos alcanzaron más del doble (4.6 Cmol⁺kg⁻¹), de lo descrito en los trabajos anteriormente mencionados (2 Cmol⁺kg⁻¹), lo cual parece estar relacionado con la adición de estiércol. No obstante, los valores de fondo de este elemento, en el tepetate utilizado, son, ya de inicio, bastante altos (2.4 Cmol⁺kg⁻¹), según lo indica T0 (tabla 12).

En trabajos similares también se observaron efectos de tratamiento en el contenido de las diferentes bases. Los cambios se atribuyeron a los aportes de nutrimentos por parte de las enmiendas utilizadas (estiércol, composta, vermicomposta e inóculo), y a la liberación de cationes por alteración (intemperismo), del tepetate (García *et al.*, 2008; Flores *et al.*, 2011).

En este sentido; Flores y colaboradores (2011), proponen que la alteración de los minerales ferromagnesianos del tepetate, resulta en un aumento de Mg^{2+} , disponible para las plantas. Por otro lado el intemperismo de feldespatos sódicos aumenta el contenido de Na^+ . Mientras tanto, para Etchevers y colaboradores (1992), el origen del K^+ no es muy claro, pues los minerales presentes en el tepetate no contienen este elemento. En general, las bases encontradas en el tepetate provienen del intemperismo de los minerales primarios que lo conforman (Hidalgo *et al.*, 2010).

El hecho de que en el presente estudio, se haya detectado un cambio mínimo (no significativo), en el contenido de Mg^{2+} (tabla 12), y un aumento considerable de Na^+ , (éste sí, bastante significativo), entre el testigo T0 y el tratamiento TAB, sugiere que el riego jugó un papel importante en la liberación de ambos elementos, reforzando lo propuesto por Flores y colaboradores (2011), con respecto a la alteración de los minerales del tepetate y el aumento en la disponibilidad de las BI.

Según lo mostrado en la tabla 12, aunque no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos en cuanto a los niveles de Ca^{2+} y Mg^{2+} , pero sí para Na^+ y K^+ , con el fin de determinar cuál de los factores influyó sobre el contenido de cada una de las BI, se realizaron las tablas 23, 24 y 25, donde se analiza el efecto del estiércol, la planta y el fertilizante por separado.

En la tabla 23 se agruparon los tratamientos sin estiércol (excepto T0), para compararlos contra los tratamientos con estiércol. En todos los casos la adición de materia orgánica aumentó el contenido de BI, aunque el Ca^{2+} no alcanzó diferencias estadísticamente significativas.

El incremento observado resulta natural si consideramos que el estiércol vacuno, contiene hasta 3.2% de Ca^{2+} , 0.8% de Mg^{2+} , 1.6% de Na^+ y 2.5% de K^+ (Trinidad A., 1987; Labrador M., 1996; Romero M., 1997), mismos que aporta al tepetate donde es añadido.

Además, la materia orgánica, independientemente de su origen, posee sitios de intercambio activos, que son capaces de retener a las BI a medida que son liberadas del tepetate por procesos de intemperismo (Buckman y Brady 1985; Hillel D., 1998; García *et al.*, 2008; Flores *et al.*, 2011).

Tabla 23. Influencia del estiércol sobre el contenido de BI

Tratamiento	----- Cmol ⁺ Kg ⁻¹ -----			
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
Sin estiércol	10.8 ±0.2 a	8.9 ±0.2 b	1.7 ±0.1 b	2.1 ±0.1 b
Con estiércol	12.4 ±0.2 a	10.9 ±0.1 a	2.5 ±0.0 a	4.3 ±0.0 a

Tratamientos sin estiércol (TAB, TDB, TDA, P, PDB y PDA); tratamientos con estiércol (TE, TEDB, TEDA, PE, PEDB y PEDA). Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=24$, con su respectivo error estándar. Donde: TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

Por su parte, el agave provocó una reducción evidente (pero no significativa), de calcio, magnesio y potasio, y un aumento mínimo (pero significativo), en los niveles de sodio, lo cual puede apreciarse en la tabla 24, donde se han agrupado los tratamientos sin planta (excepto T0), para compararlos contra los tratamientos con planta.

El agave pudo absorber estos cationes como parte de sus requerimientos nutrimentales, al mismo tiempo, la extracción de cationes y la adición de ácidos orgánicos y protones (H⁺), por intervención de la planta, favorecería la acidificación del tepetate observada en las tablas 12 y 13 (Sparks D., 2003).

A su vez, la extracción de Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺, pudo dejar libres algunos sitios dentro del complejo de cambio, que pudieron ser ocupados por el Na⁺ liberado por el intemperismo de los feldespatos sódicos contenidos en el tepetate (Flores *et al.*, 2011).

Tabla 24. Influencia de la planta sobre el contenido de BI

Tratamiento	----- Cmol ⁺ Kg ⁻¹ -----			
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
Sin planta	12.3 ±0.02 a	10.2 ±0.3 a	2.0 ±0.1 b	3.3 ±0.1 a
Con planta	10.9 ±0.2 a	9.6 ±0.2 a	2.3 ±0.1 a	3.2 ±0.0 a

Tratamientos sin planta (TAB, TDB, TDA, TE, TEDB y TEDA); tratamientos con planta (P, PDB, PDA, PE, PEDB y PEDDA). Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=24$, con su respectivo error estándar. Donde: TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

En la tabla 25 se agruparon los tratamientos sin fertilizante (excepto T0), para compararlos contra los tratamientos con dosis baja y alta de fertilizante. Este factor no causó diferencias significativas en el contenido de calcio y magnesio, pero si un decremento ligero en los niveles de sodio y potasio.

El descenso de estas dos bases podría relacionarse con la acidificación ocasionada por el fertilizante (tablas 12 y 15). Pues, como se explicó anteriormente, el descenso en el pH conduce a la reducción de la CIC; con menos sitios de intercambio disponibles, las bases liberadas, producto de la alteración del tepetate, pudieron ser lixiviadas durante el riego, al fondo de la unidad experimental, y quedar fuera de consideración durante la toma de muestra. De hecho, el magnesio también resultó afectado por la adición del fertilizante químico, aunque no de manera estadísticamente significativa (tabla 25).

Tabla 25. Influencia del fertilizante sobre el contenido de BI

Tratamiento	----- Cmol ⁺ Kg ⁻¹ -----			
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
Sin fertilizante	11.4 ± 0.5 a	10.0 ± 0.2 a	2.3 ± 0.1 a	3.4 ± 0.1 a
dosis baja	11.9 ± 0.2 a	9.9 ± 0.4 a	2.1 ± 0.1 b	3.2 ± 0.0 b
dosis alta	11.5 ± 0.4 a	9.7 ± 0.4 a	2.1 ± 0.2 b	3.2 ± 0.0 b

Tratamientos sin fertilizante (TAB, TE, P y PE); tratamientos con dosis baja de fertilizante (TDB, TEDB, PDB y PEDB); tratamientos con dosis alta de fertilizante (TDA, TEDA, PDA y PEDDA). Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=16$, con su respectivo error estándar. Donde: TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

En general, la planta y el fertilizante causaron disminución en el contenido de BI, probablemente por la extracción directa de nutrimentos por las raíces del organismo vegetal, y de manera indirecta por la disminución de los sitios de intercambio provocada por la acidez. En contraparte, el estiércol favoreció el aumento de estos cationes, presumiblemente por aporte directo de los nutrimentos contenidos en la propia enmienda, o bien, por la adición de los sitios de intercambio que posee la materia orgánica, y que pudieron retener a las BI liberadas por el intemperismo del tepetate.

En condiciones de campo, en tepetates roturados, con formas de manejo tradicionales, se han obtenido resultados muy similares a los nuestros (Covaleda *et al.*, 2009), donde las BI disminuyen con el tiempo (luego de apenas 4 años bajo esta práctica de uso), aparentemente por extracción por parte de las raíces de los cultivos, la única diferencia notable, es que los niveles de Na^+ también se ven disminuidos, probablemente porque sufren una lixiviación hacia capas más profundas durante el riego. Bajo esta forma de manejo, el pH del tepetate también resulta disminuido.

Por otro lado, bajo un manejo orgánico, el tepetate roturado (Covaleda *et al.*, 2009), incrementa sus niveles de K^+ (por adición de este elemento contenido en enmiendas orgánicas), y mantiene estable su valor de pH.

Según la Norma Oficial Mexicana; NOM-021-SEMARNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2002), el contenido de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en todos los tratamientos, puede clasificarse como: alto. Sin embargo, al igual que en el caso de la CIC, los valores más elevados se registraron en los tratamientos con estiércol (TE, TEDB, TEDA, PE, PEDB y PEDA), por lo que, la adición de materia orgánica, resultó la manera más conveniente de mejorar esta característica del tepetate.

Óxidos de elementos mayores – Índices de Intemperismo

En la tabla 26 se muestran los resultados de la evaluación de Óxidos de Elementos Mayores, que a su vez, fueron utilizados para calcular los Índices de Intemperismo (tabla 27). Dentro de los óxidos pertenecientes a los elementos considerados inmóviles (Si, Al, Ti y Fe), se nota un claro dominio del óxido de sílice (con 52% en el testigo inalterado T0), mientras que para las bases o elementos móviles (Ca, Mg, Na y K), el más abundante es el óxido de calcio (3.4%). Ya que las determinaciones de óxidos fueron realizadas con base a muestras compuestas, no se incluyen promedios, ni errores estándar. También, al comparar los tratamientos con el testigo inalterado T0, se nota un descenso en el contenido de SiO₂, este descenso es más notorio en los tratamientos con planta y estiércol (PE, PEDB y PEDA), también se registra un ligero aumento en la cantidad de Fe₂O₃, principalmente en los tratamientos con planta y sin estiércol (P y PDA), mientras que los óxidos de titanio y aluminio no presentan tendencias en particular.

En cuanto a los elementos móviles, el calcio, el magnesio y el sodio disminuyeron, con especial énfasis en los tratamientos con planta y sin estiércol (P, PDB y PDA). El potasio aumentó de manera evidente en los tratamientos con estiércol (TE, TEDB, TEDA, PE, PEDB y PEDA), y disminuyó en todos los tratamientos a los que no se les agregó materia orgánica, pero con mayor notoriedad en los que además se incluyó agave (P, PDB, PDA).

Tabla 26. Concentración de óxidos de elementos mayores

Tratamientos	----- % -----							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
T0	52.60	22.25	6.86	1.04	3.41	2.07	2.06	0.42
TAB	51.93	23.01	6.96	1.05	3.32	2.03	2.02	0.42
TDB	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
TDA	52.64	21.76	7.12	1.04	3.21	1.78	1.98	0.39
TE	51.55	22.27	7.05	1.08	3.39	1.83	2.01	0.51
TEDB	51.53	21.78	6.91	1.04	3.31	1.86	1.91	0.55
TEDA	51.04	22.35	6.96	1.05	3.45	2.05	2.01	0.51
P	51.42	22.92	7.20	1.12	3.17	1.88	1.95	0.36
PDB	52.36	22.01	7.03	1.03	3.05	1.67	1.80	0.38
PDA	51.70	22.39	7.18	1.05	3.13	1.71	1.84	0.37
PE	51.22	22.05	6.79	1.02	3.27	2.03	1.94	0.52
PEDB	50.74	22.54	6.85	1.02	3.22	1.96	1.89	0.51
PEDA	51.19	22.73	6.78	1.04	3.51	2.07	2.09	0.47

Los valores son resultado del análisis de muestras compuestas conformadas por las cuatro repeticiones de cada tratamiento. Donde: T0: Material original, roturado y tamizado, pero sin enmiendas, planta, ni riego, TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta. nd: dato no disponible.

Los Índices de Intemperismo evaluados fueron el índice de Parker (IP), relación sílice-aluminio (SA), índice alteración química (CIA), relación bases-alúmina (Bases/Alúmina), y relación bases-sesquióxidos (Bases/R₂O₃), y se muestran en la tabla 27. Ya que las determinaciones fueron realizadas con base a muestras compuestas, no se incluyen promedios, ni errores estándar.

Tabla 27. Índices de Intemperismo

Tratamientos	IP	SA	CIA	Bases / Alumina	Bases / R ₂ O ₃
T0	25.7	4.0	68.9	0.687	0.547
TAB	25.1	3.8	70.1	0.649	0.518
TDB	nd	nd	nd	nd	nd
TDA	23.9	4.1	69.6	0.645	0.508
TE	25.1	3.9	69.0	0.658	0.520
TEDB	24.7	4.0	69.1	0.664	0.525
TEDA	25.9	3.9	68.8	0.685	0.544
P	23.8*	3.8*	71.0*	0.616*	0.487*
PDB	22.3*	4.0	71.2*	0.597*	0.472*
PDA	22.7*	3.9	71.1*	0.600*	0.474*
PE	25.1	3.9	69.4	0.673	0.536
PEDB	24.4	3.8*	70.3	0.641	0.512
PEDA	26.3	3.8*	68.8	0.684	0.548

*.- Tratamientos con mayor intemperismo, de acuerdo al índice utilizado. IP.- índice de Parker. SA.- Relación Sílice-Aluminio. CIA.- índice Alteración Química. Bases/Alúmina.- Relación Bases-Alúmina. Bases/R₂O₃.- Relación Bases-Sesquióxidos. Los índices fueron calculados a partir de muestras compuestas conformadas por las cuatro repeticiones de cada tratamiento. Donde: T0: Material original, roturado y tamizado, pero sin enmiendas, planta, ni riego, TAB: testigo absoluto; TDB: testigo con fertilizante dosis baja; TDA: testigo con fertilizante dosis alta; TE: tepetate estiércol; TEDB: tepetate estiércol y fertilizante dosis baja; TEDA: testigo estiércol y fertilizante dosis alta; P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta. nd: dato no disponible.

Los índices de intemperismo están basados en el principio de que la proporción entre concentraciones de elementos móviles e inmóviles debe decrecer con el tiempo,

conforme la lixiviación progresa (Munroe *et al.*, 2007). Así, al evaluar estos índices, se comparan los valores obtenidos en cada muestra, con los que presenta el material inalterado (el material inalterado corresponde al testigo T0), de esta forma se determina si la muestra analizada ha experimentado más o menos meteorización con respecto al material parental y también permite la comparación entre muestras (Bih *et al.*, 2012).

Índice de Parker (IP)

En el caso del Índice de Parker, en la tabla 27, se observa que todos los tratamientos (excepto TEDA y PEDDA), presentan valores por debajo de 25.7 (estimación que corresponde al testigo inalterado T0). Ya que el IP disminuye a medida que las bases del sustrato se pierden (Sarabia *et al.*, 2006; Souria *et al.*, 2006; Shao *et al.*, 2012), los resultados indican una pérdida de bases. Ésta pérdida es evidencia de la meteorización que sufrieron los tratamientos, muy probablemente por acción del riego durante la fase experimental.

También hay pérdida de bases por la acción de la planta, pues los valores más bajos se encuentran en aquellos tratamientos que incluyeron agave, pero no estiércol (P, PDB y PDA). Ésta reducción podría explicarse por la extracción de cationes que lleva a cabo el agave para satisfacer sus requerimientos nutrimentales (Sverdrup 2009).

Por otra parte, los tratamientos que incluyeron estiércol presentan una pérdida de bases menos notoria, incluso los valores de IP de los tratamientos TEDA y PEDDA superan al de T0, esto tendría su explicación por el aporte de bases contenidas en el mismo estiércol (Trinidad A., 1987; Labrador M., 1996; Romero M., 1997), y también por los fertilizantes que fueron agregados en esos tratamientos en particular.

En términos generales se podría señalar una mayor alteración en aquellos tratamientos que incluyeron planta (P, PDB y PDA), lo cual es coherente, pues los exudados de las raíces aumentan la disolución de los minerales. Las especies vegetales pueden ocasionar diferencias en el intemperismo entre sitios, pues la alteración es más intensa en los lugares con mayor producción de soluciones ácidas en el suelo (Sverdrup 2009; Palviainen *et al.*, 2012). Los resultados de pH (tabla 12 y figura 16), coinciden con esta

observación, pues los tratamientos con pH más ácidos, resultaron con un IP más bajo y por tanto más intemperizadas.

Relación Sílice-Aluminio (SA)

Al igual que el Índice de Parker, la relación Sílice – Aluminio disminuye al progresar el intemperismo (Sarabia *et al.*, 2002; Darmody *et al.*, 2005), en la tabla 27, se muestra que la mayor parte de los tratamientos presentan valores de SA ligeramente más bajos que el testigo inalterado T0 (cuyo valor es de 4.0), lo cual indica que el riego constituyó un factor importante para la alteración de las muestras, sin embargo, tres de los tratamientos (TDA, TEDB y PDB), presentaron un SA más alto o igual (4.1, 4.0 y 4.0 respectivamente), al testigo T0, sin que exista una tendencia o relación aparente entre estos tres tratamientos.

La disminución en los valores de SA, señala que el material sufrió alteraciones durante el tiempo de experimentación, estas alteraciones se refieren a la pérdida de sílice (Darmody *et al.*, 2005).

No existe una tendencia clara en los tratamientos cuyo SA resultó disminuido, aunque si se podría señalar que los tratamientos con valores más bajos (3.81, 3.82 y 3.82), consideraban la presencia de agave (P, PEDB y PEDA respectivamente). Ya que no parece existir una relación entre el comportamiento de SA y el pH, no resulta claro el mecanismo por el cual el agave afectó la relación SA.

A diferencia del Índice de Parker, la relación Sílice-Aluminio no parece haber sido afectada por la adición de materia orgánica, de esta manera los tratamientos con estiércol parecen haber sufrido tanto intemperismo, como aquellos donde no se incluyó esta enmienda.

Índice de Alteración Química (CIA)

A diferencia del Índice de Parker y de la Relación Sílice-Aluminio, el Índice de Alteración Química (CIA), aumenta conforme se incrementa el grado de intemperismo (Duzgoren *et al.*, 2002; Shao *et al.*, 2012), por tanto, al analizar la tabla 27, resulta que la mayor parte de los tratamientos (excepto TEDA y PEDDA), sufrieron alteraciones durante la fase experimental. Por otra parte, las muestras más intemperizadas corresponden a los tratamientos con planta y sin estiércol (P, PDB y PDA).

Nuevamente, el riego parece jugar un papel primario en la meteorización del tepetate, fenómeno que se ve potenciado con la acción del agave. En este caso, si es posible establecer una relación directa entre el pH (tabla 12 y figura 16), y el CIA (tabla 27), pues los tratamientos más acidificados son también los que presentan un mayor Índice de Alteración Química.

Generalmente el CIA se interpreta como una medida de la conversión de los feldespatos a arcillas (Shao *et al.*, 2012), sin embargo, no fue posible asegurar que existe neoformación de arcillas dentro de las unidades experimentales. En su lugar, se puede sugerir simplemente, que existe pérdida de las bases que se incluyen en la formulación de este índice (Ca^{2+} , Na^+ y K^+), lo cual, en realidad ocurre. Esto puede apreciarse en la tabla 26, al comparar el contenido de estas tres bases en el testigo T0, con respecto al resto de los tratamientos (excepto TEDA y PEDDA).

Tal como sugieren Shao y colaboradores (2012), el IP y el CIA se correlacionaron muy bien, coincidiendo en cuales son los tratamientos que presentan mayor intemperismo (P, PDB y PDA), y cuales son los que presentan menor alteración (TEDA y PEDDA).

Relación Bases-Alúmina y Bases-Sesquióxidos

En cuanto a las relaciones Bases/Alúmina, y Bases-Sesquióxidos ($\text{Bases}/\text{R}_2\text{O}_3$), un valor decreciente con respecto al material parental, refleja mayor avance en el intemperismo (Sarabia *et al.*, 2002; Munroe *et al.*, 2007).

Según los datos de la tabla 27, las relaciones Bases/Alúmina y Bases/R₂O₃, mostraron una gran coincidencia entre ellas y con los índices IP y CIA, donde los tratamientos más alterados fueron aquellos con planta y sin estiércol (P, PDB y PDA), y los menos intemperizados las muestras referentes a TEDA y PEDDA.

En general, los índices analizados indican una desbasificación del tepetate, acentuada por la presencia de agave. Esta pérdida de cationes se ve mitigada cuando el tratamiento incluye al factor estiércol.

El riego bastó para generar alteraciones, pues incluso en el testigo TAB, que no incluía adición de ninguna enmienda, mostró cambios con respecto al testigo inalterado T0.

Al parecer, la vía principal por la que la planta influyó sobre intemperismo fue la acidificación del medio.

La relación SA no coincidió del todo con el resto de los índices evaluados, pero sus datos también sugieren que los factores esenciales para alterar el tepetate fueron el riego y la especie vegetal.

Los resultados del parámetro “Bases Intercambiables” (tabla 12), confirman la desbasificación que, aunque no es estadísticamente significativa, si es bastante tangible, especialmente en los tratamientos con planta y sin estiércol (tabla 24).

Aunque no se observó una relación directa entre pH y los valores obtenidos de SA, las raíces de la plantas pudieron propiciar la aparición de micro ambientes donde se diera un cambio de pH muy localizado y una mayor disolución de minerales primarios (Duzgoren *et al.*, 2002).

Si bien el IP, CIA y las relaciones Bases/Alúmina y Bases/R₂O₂ parecen funcionar mejor que el SA para evaluar el intemperismo en este tipo de materiales, es de considerar que SA permitió detectar la pérdida de sílice, evento que por si mismo resulta bastante relevante, tomando en cuenta que el sílice se encuentra dentro de los elementos considerados inmóviles, por tanto; el que se hayan encontrado diferencias entre

tratamientos en los datos arrojados por SA, aún cuando el tiempo de experimentación fue relativamente corto, es poco común.

En ese sentido, mantener a todas las unidades experimentales (excepto al testigo inalterado T0), con cierto grado de humedad, fue un punto clave para propiciar el intemperismo químico, pues éste es causado por las reacciones que se dan entre los constituyentes disueltos en la solución del suelo y que entran en contacto con la superficie sólida (Sverdrup H. 2009). Además, el agua actúa como interfase entre los organismos (incluyendo a las raíces de las plantas), y la materia sólida del suelo, permitiendo la absorción de nutrimentos, la descomposición y el intercambio de iones (Sverdrup 2009).

2. Parámetros del Agave

a) Características Morfológicas

Los resultados de las mediciones morfológicas del agave se muestran en la tabla 28, misma que incluye un promedio de las cuatro repeticiones de cada tratamiento con su respectivo error estándar. Las diferencias estadísticamente significativas no abundan, incluso podría decirse que no hay un efecto de tratamiento notable, sin embargo, la situación cambia cuando no sólo se compara entre tratamientos si no entre factores (tabla 29 y figura 21), donde resalta que el estiércol afectó el desarrollo del agave de tal manera, que la mayor parte de los factores morfológicos evaluados (excepto Número de Raíces), presentan diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 28. Morfología del Agave

Tratamiento	Altura de la planta (cm)	Número de hojas	Ancho de la hoja (cm)	Largo de la hoja (cm)	Número de raíces	Longitud de raíces (cm)
P	30.6 ±1.2 b	7.7 ±0.3 b	3.9 ±0.1 a	36.3 ±2.2 b	14 ±1.0 a	81.2 ±14.5 a
PDB	31.0 ±1.4 b	8.0 ±0.4 b	4.0 ±0.1 a	38.1 ±1.2 ab	14 ±1.5 a	83.5 ±5.5 a
PDA	30.8 ±1.1 b	8.7 ±0.6 ab	4.2 ±0.1 a	37.7 ±2.2 ab	12 ±2.0 a	62.2 ±5.0 a
PE	39.4 ±1.2 a	10.2 ±0.5 a	4.4 ±0.2 a	47.0 ±1.3 a	14 ±1.0 a	100.7 ±8.5 a
PEDB	33.1 ±2.4 ab	9.7 ±0.5 ab	4.2 ±0.1 a	43.7 ±1.8 ab	13 ±0.5 a	106.7 ±11.0 a
PEDA	36.1 ± 1.5 ab	10.2 ±0.5 a	4.4 ±0.1 a	46.4 ±3.9 ab	13 ±1.5 a	84.2 ±15.5 a

Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=4$, con su respectivo error estándar; y donde: P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta. Número de hojas y número de raíces se refiere al número de éstas por planta, mientras que; ancho de la hoja, largo de la hoja y longitud de raíces se refiere al valor máximo que alcanzaron en cada planta.

La adición de estiércol benefició considerablemente el desarrollo del agave, (tabla 29 y figura 21), debido al papel que juega la materia orgánica en el suministro de nutrimentos para el desarrollo de las especies vegetales (Buckman y Brady 1985; Labrador M., 1996; Porta *et al.*, 1999).

Además, se sabe que algunas bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+), como las que se encuentran en el estiércol añadido, pueden influir específicamente en alguna de las características morfológicas de los agaves (Nikolaeva y Niño 2007). Por ejemplo, la deficiencia de potasio puede reducir la tasa de emisión de hojas nuevas, lo cual coincide con nuestras observaciones, pues aquellos tratamientos que no contaron con estiércol y por

tanto, tuvieron menor cantidad de potasio disponible (tabla 23), produjeron menor Número de Hojas (tabla 29).

Tanto el potasio como el nitrógeno influyen en el crecimiento general del agave (Bautista *et al.*, 2007; Nikolaeva y Niño 2007), lo cual se ve reflejado en los parámetros de Altura de la Planta, Largo de la Hoja y Longitud de Raíces. Los tratamientos que contaron con mayor cantidad de estos elementos (contenidos en el estiércol añadido), tuvieron mejor respuesta, siendo superiores en prácticamente todos los aspectos morfológicos (excepto Número de Raíces), (tabla 29).

Tabla 29. Influencia del Estiércol sobre la Morfología del Agave

Tratamiento	Altura de la planta (cm)	Número de hojas	Ancho de la hoja (cm)	Largo de la hoja (cm)	Número de raíces	Longitud de raíces (cm)
Sin estiércol	30.8 ± 0.7 b	8.2 ± 0.3 b	4.1 ± 0.1 b	37.4 ± 1.0 b	13.1 ± 0.9 a	75.7 ± 5.7 b
Con estiércol	36.2 ± 1.2 a	10.1 ± 0.3 a	4.3 ± 0.1 a	45.8 ± 1.4 a	13.4 ± 0.6 a	97.3 ± 7.0 a

Tratamientos sin estiércol (P, PDB y PDA); tratamientos con estiércol (PE, PEDB y PEDA). Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=12$, con su respectivo error estándar; y donde: P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

De entre los parámetros morfológicos, tanto la Altura, como el Largo de las Hojas (figura 21), presentaron diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0.01$). Al parecer, estos rasgos anatómicos reflejan mejor la disponibilidad de nutrientes (principalmente nitrógeno y potasio), en el entorno el *Agave angustifolia* How.

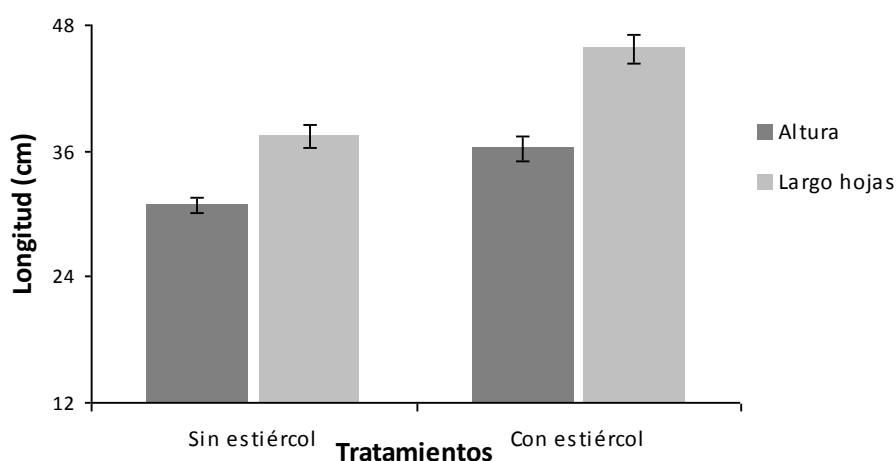


Figura 21. Diferencias de parámetros morfológicos promovidos por el estiércol. Destacaron la Altura y el Largo de las Hojas. Se grafican medias de $n=12$. Las líneas de variabilidad representan el error estándar. Tratamientos sin estiércol (P, PDB y PDA); tratamientos con estiércol (PE, PEDB y PEDA). Donde: P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

En cuanto al fertilizante, este no causó efectos evidentes sobre los parámetros morfológicos, probablemente la dosis utilizada no fue lo suficientemente alta, o bien, debió darse una segunda aplicación, pues para el cultivo de *Agave angustifolia* el INIFAB (2000), recomienda la aplicación de fertilizantes inorgánicos anualmente, mientras que nosotros sólo realizamos una fertilización al inicio del experimento.

Finalmente, se puede resaltar que en ningún caso los agaves presentaron síntomas visuales de deficiencias de macro elementos. Así que el tepetate roturado, incluso sin ningún tipo de enmienda, puede “sostener” sin mayor problema un cultivo de agave, al menos durante los primeros 17 meses de vida. No obstante, es conveniente la adición de materia orgánica para optimizar el crecimiento de estos organismos, en especial si se pretende una explotación comercial.

b) Biomasa

La tabla 30 contiene los resultados de Biomasa del Agave. Ésta tabla incluye un promedio de las cuatro repeticiones de cada tratamiento con su respectivo error estándar. Al igual que en el caso de Morfología, las diferencias estadísticamente significativas no abundan. Sólo cuando se analiza el efecto individual de cada factor, sobresale que el estiércol permitió un mayor desarrollo de la biomasa vegetal, que se reflejó en diferencias estadísticamente significativas en todos los parámetros evaluados (excepto Peso de Raíz Seco), (tabla 31 y figura 22).

Tabla 30. Biomasa de la planta

Tratamiento	Peso completo húmedo (g)	Peso piña húmedo (g)	Peso hojas húmedo (g)	Peso hojas seco (Phs) (g)	Peso Raíz húmedo (g)	Peso Raíz seco (Prs) (g)	Prs/Phs
P	331.7 ±28 b	77.3 ±4 a	185.4 ±17 b	31.4 ±3 a	68.9 ±12 a	23.7 ±2 a	0.78 ±0.1 a
PDB	373.2 ±33 b	80.5 ±7 a	218.6 ±23 b	35.1 ±2 a	74.0 ±12 a	27.7 ±1 a	0.79 ±0.0 a
PDA	373.3 ±40 b	75.3 ±6 a	234.4 ±25 b	29.8 ±2 a	63.5 ±15 a	21.6 ±6 a	0.71 ±0.2 a
PE	592.5 ±29 a	108.3 ±6 a	369.5 ±15 a	61.9 ±7 a	114.6 ±12 a	35.2 ±3 a	0.59 ±0.1 a
PEDB	512.6 ±78 ab	91.4 ±16 a	316.0 ±41 ab	66.7 ±29 a	105.1 ±22 a	32.9 ±8 a	0.55 ±0.2 a
PEDA	559.8 ±31 ab	109.3 ±4 a	350.8 ±20 a	105.1 ±17 a	99.6 ±24 a	31.5 ±2 a	0.31 ±0.0 a

Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=4$, con su respectivo error estándar. Prs/Phs: relación entre biomasa subterránea y biomasa aérea. Donde: P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

Cuando los tratamientos que incluyeron estiércol (PE, PEDB y PEDA), se analizan en conjunto, resalta que el agave tuvo una producción de biomasa apreciablemente mayor en éstos, que en aquellos donde no se incluyó la enmienda (P, PDB y PDA), (tabla 31 y figura 22), ya que la materia orgánica aporta una cantidad valiosa de nutrimentos para las especies vegetales (Buckman y Brady 1985; Labrador M., 1996; Porta *et al.*, 1999), las diferencias entre ambos conjuntos de tratamientos eran de esperarse.

Se sabe que algunos de estos nutrimentos afectan directamente el desarrollo de alguna parte anatómica de la planta en específico, por ejemplo, en agaves, el K^+ fomenta el crecimiento radical y la producción de hojas (Nikolaeva y Niño 2007), lo cual coincide con lo observado en la tabla 31 (peso Raíz Húmedo, Peso Hojas Húmedo y Peso Hojas Seco), el aumento en la biomasa de cada parte del maguey repercute a su vez en el Peso total o Completo del agave y por tanto en el valor económico de cada planta.

De la misma manera, el Ca^{2+} es un elemento importante para la formación de todos los tejidos de las plantas de agave (Chávez *et al*, 2012), por lo que su adición, dentro del estiércol, muy probablemente influyó, como el potasio y el nitrógeno, en aumentar la biomasa de la planta en los tratamientos donde se incluyó la enmienda orgánica.

Tabla 31. Influencia del Estiércol sobre la Biomasa de la Planta

Tratamiento	Peso completo (g)	Peso piña (g)	Peso hojas húmedo (g)	Peso hojas seco (Phs) (g)	Peso Raíz húmedo (g)	Peso Raíz seco (Prs) (g)	Prs/Phs
Sin estiércol	359.4 ±19 b	77.7 ±3 b	212.8 ±13 b	32.1 ±1 b	68.9 ±7 b	24.4 ±2 a	0.76 ±0.1 a
Con estiércol	555.0 ±29 a	103.1 ±6 a	345.5 ±16 a	77.9 ±12 a	106.5 ±11 a	33.3 ±3 a	0.49 ±0.1 b

Tratamientos sin estiércol (P, PDB y PDA); tratamientos con estiércol (PE, PEDB y PEDA). Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=12$, con su respectivo error estándar. Prs/Phs: relación entre biomasa subterránea y biomasa aérea. Donde: P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

Tanto el Peso Completo, como el Peso de las Hojas Húmedo (figura 22), presentaron diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0.01$). Por lo que se estima que estos parámetros reflejan mejor la disponibilidad de nutrimentos en torno al *Agave angustifolia* Haw.

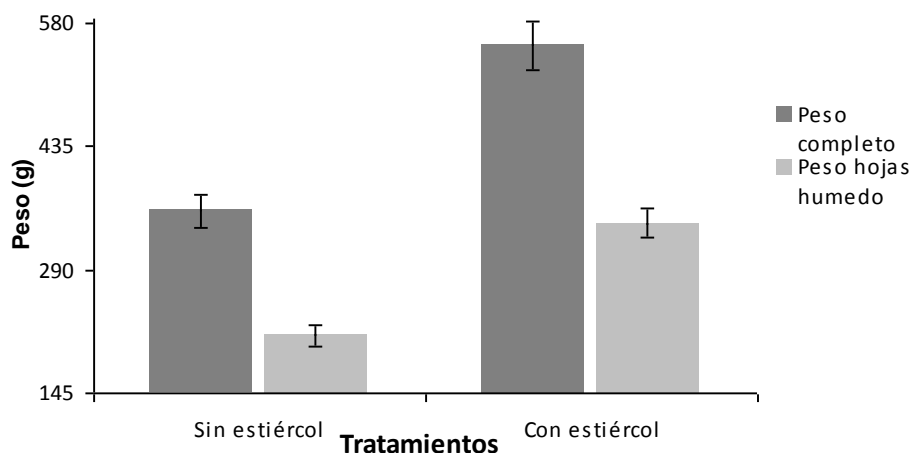


Figura 22. Diferencias en la producción de biomasa del agave, promovidas por el estiércol. Destaca el Peso Completo y de las Hojas. Se grafican medias de $n=12$. Las líneas de variabilidad representan el error estándar. Tratamientos sin estiércol (P, PDB y PDA); tratamientos con estiércol (PE, PEDB y PEDA). Donde: P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

El factor fertilizante no causó diferencias significativas, probablemente la dosis utilizada no fue suficiente como para causar efectos favorables luego de 14 meses de su aplicación, pues para el cultivo de *Agave angustifolia* Haw el INIFAB (2000), recomienda el uso de fertilizantes químicos anualmente. De hecho, con aplicaciones anuales de nitrógeno,

fósforo y potasio inorgánicos, se ha observado incremento en la producción de *Agave tequilana* (Gobeille *et al.*, 2006).

La relación biomasa subterránea/biomasa aérea (Prs/Phs), mostró ser más alta en los tratamientos que no incluyeron adición de materia orgánica (tablas 30 y 31). Lo cual sugiere que los agaves, a los que no se les proporcionó estiércol, tuvieron que dedicar mayor “esfuerzo” para desarrollar una raíz lo suficientemente robusta, que les permitiera satisfacer sus necesidades de agua y nutrimentos (Cañellas y San Miguel 1996). Ya que en el mercado, sólo se comercializa la parte aérea de *Agave angustifolia* Haw, es más redituable obtener cultivos cuyas plantas hayan desarrollado mayor cantidad de biomasa aérea.

Los tratamientos con estiércol (PE, PEDB, PEDA), permitieron un mayor crecimiento de las plantas de agave.

c) Calidad del Agave

En la tabla 32 se muestran la cantidad de jugo extraído y el porcentaje de azúcares reductores totales (ART), cuantificados en el mismo jugo, la tabla incluye un promedio de las cuatro repeticiones de cada tratamiento con su respectivo error estándar. No se encontraron diferencias estadísticas entre tratamientos para ninguno de los parámetros.

Aún cuando no hubo diferencias entre tratamientos, y ya que el contenido de azúcares en agaves se utiliza como un índice de calidad de este cultivo, en especial si se destinará a la producción de bebidas alcohólicas, resulta notable que en todos los casos se presenten porcentajes de azúcar mayores al 30%, ya que el mínimo para considerar que la planta es de buena calidad es del 25% (Bautista *et al.*, 2001).

Tabla 32. Jugo extraído y Determinación Azúcares Reductores Totales

Tratamiento	Jugo (ml/planta)	ART (%)
P	33.5 ±1 a	31.9 ±5 a
PDB	37.1 ±4 a	30.1 ±4 a
PDA	33.5 ±4 a	33.1 ±1 a
PE	47.4 ±6 a	35.2 ±2 a
PEDB	40.3 ±8 a	31.4 ±3 a
PEDA	51.1 ±4 a	36.1 ±1 a

Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=4$, con su respectivo error estándar. Donde: ART: Azúcares reductores totales. P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

Para comprobar si las enmiendas jugaron un papel importante en el porcentaje de azúcares producidas, en la tabla 33 se compararon la influencia del factor estiércol, agrupando y comparando los tratamientos que incluyeron esta enmienda (PE, PEDB y PEDA), contra los que no la incluyeron (P, PDB y PDA). Destaca que no se encontraron diferencias significativas en cuanto al porcentaje de ART, pero si en la cantidad de jugo que se produce. Los tratamientos con adición de materia orgánica rindieron hasta una tercera parte más (12 ml), que el resto (figura 23).

Tabla 33. Influencia del estiércol en la producción de Jugo y Azúcares Reductores Totales

Tratamiento	Jugo (ml/planta)	ART (%)
Sin estiércol	34.7 ±1.7 b	31.7 ±1.9 a
Con estiércol	46.3 ±3.7 a	34.4 ±1.3 a

Tratamientos sin estiércol (P, PDB y PDA); tratamientos con estiércol (PE, PEDB y PEDA). Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=12$, con su respectivo error estándar. Donde: ART: Azúcares reductores totales. P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta

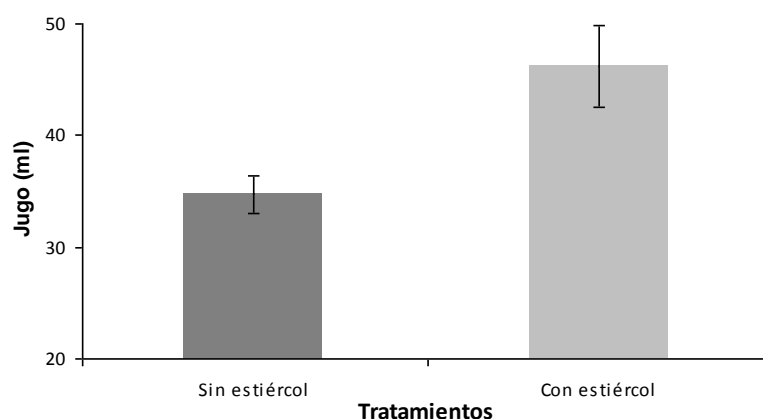


Figura 23. Diferencias en la cantidad de jugo producido por el agave, causadas por la presencia de estiércol. Se grafican medias de $n=12$. Las líneas de variabilidad representan el error estándar. Tratamientos sin estiércol (P, PDB y PDA); tratamientos con estiércol (PE, PEDB y PEDA). Donde: P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta

Por otra parte, en la tabla 34 se comparan los tratamientos sin fertilizante (P y PE), los tratamientos con dosis baja (PDB y PEDB) y los tratamientos con dosis alta (PDA y PEDA). No se observan diferencias inducidas por este factor en la cantidad de jugo producida, ni en el porcentaje de azúcares en el mismo jugo.

Tabla 34. Influencia del fertilizante en la producción de Jugo y Azúcares Reductores Totales

Tratamiento	Jugo (ml/planta)	ART (%)
Sin fertilizante	40.4 ±4.0 a	33.5 ±2.6 a
Dosis baja	38.7 ±4.3 a	30.6 ±2.3 a
Dosis alta	42.3 ±4.1 a	34.6 ±1.1 a

Tratamientos sin fertilizante (P y PE); tratamientos con dosis baja de fertilizante (PDB y PEDB); tratamientos con dosis alta de fertilizante (PDA y PEDA). Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=8$, con su respectivo error estándar. Donde: ART: Azúcares reductores totales. P: planta (agave); PDB: planta con fertilizante dosis baja; PDA: planta con fertilizante dosis alta; PE: planta estiércol; PEDB: planta estiércol y fertilizante dosis baja; PEDA: planta estiércol y fertilizante dosis alta.

Al parecer las condiciones dentro de las unidades experimentales fueron suficientemente buenas como para permitir el desarrollo de agaves de buena calidad (en base a su alto contenido de azúcares), incluso en aquellos tratamientos donde no se aplicó ningún tipo de enmienda (tratamiento P). No obstante, cabe resaltar que los tratamientos con adición de materia orgánica produjeron mayor cantidad de jugo. Dado que la cantidad de jugo está en relación directa con el peso del agave (figura 24), resulta económicamente más redituable obtener agaves más jugosos y pesados (éste cultivo se comercializa en base a su peso fresco). Por lo tanto, la adición de materia orgánica resultaría económicamente conveniente para los productores.

En la figura 24, se observa una relación directamente proporcional entre el peso del agave y su contenido de jugo, el cual, como se mencionó anteriormente, posee una concentración de azúcares superior al 30%. Es posible que, de conservarse estas características hasta la edad adulta de la planta, puedan observarse mejores rendimientos en la producción de bebidas alcohólicas (mezcal), pues normalmente por cada litro de mezcal se desechan de 15 a 33Kg de bagazo (en peso húmedo), (Chávez e Hinojosa 2010; Chávez *et al.*, 2012), sin embargo, con los datos obtenidos, no es posible establecer si el agave sería capaz de mantener esta tendencia.

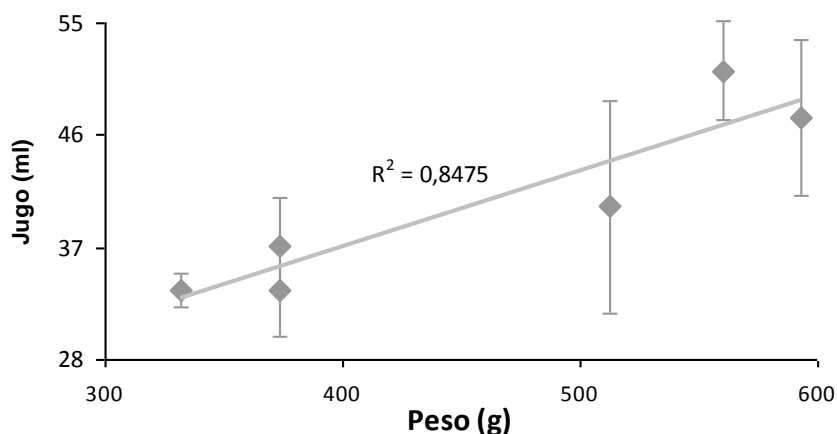


Figura 24. Cantidad de jugo en relación con el peso del agave. Entre más pesada es la planta, mayor cantidad de jugo que contiene. Se grafican medias de $n=4$. Las líneas de variabilidad representan el error estándar de la variable "Jugo". r Pearson=0.921

Según algunos estudios realizados en *Agave tequilana* Weber, organismo que se encuentra cercanamente emparentado con el *Agave angustifolia* Haw (Vargas *et al.*, 2009), la máxima concentración de azúcares en dichas plantas, se alcanza cuando éstas cumplen

los dos años de edad (Arrizon *et al.*, 2010). Dado que los organismos vegetales utilizados en este trabajo, tenían apenas 17 meses al momento de ser cosechados para su análisis, es posible que durante los siguientes días alcanzaran una concentración de azúcares mayor, quizá entonces se habrían encontrado diferencias estadísticas significativas entre tratamientos.

El hecho de encontrar acumulaciones de azúcar tan elevadas en plantas tan jóvenes, abre la posibilidad de disminuir el tiempo de cosecha para utilizarlas en la elaboración de bebidas alcohólicas (lo cual normalmente toma de 7 a 10 años) (Bautista *et al.* 2007), a sólo seis años y medio, con consecuencias económicamente favorables para los productores. No obstante, esta alteración en la edad de los agaves podría afectar la calidad de la bebida obtenida, por tanto habrían que analizarse otros factores implicados en la manufacturación de estos productos (Arrizon *et al.*, 2010).

Aunque comúnmente se asume que *Agave angustifolia* Haw, puede crecer en suelos superficiales sin fertilizar, éste sistema, como ocurre en otras plantaciones permanentes, puede alterar el pH, la CIC y agotar los nutrimentos del suelo si no se lleva a cabo una restitución externa de los mismos (Gobeille *et al.*, 2006; Bautista *et al.*, 2007), por tanto, si bien utilizar el tepetate roturado, sin enmiendas, como sustrato para el cultivo de esta planta pueda dar como resultado agaves de muy buena calidad, lo más recomendable es añadir abonos orgánicos e inorgánicos para mejorar su fertilidad e impedir la futura degradación física y química del tepetate roturado.

Desafortunadamente, se sabe que la mayor parte de los productores de *Agave angustifolia* Haw, no llevan a cabo la fertilización de sus campos, o bien, lo hacen solamente de acuerdo a sus ingresos y no como producto de un análisis químico del suelo o de resultados experimentales (Bautista *et al.*, 2007).

Con respecto a la edad de las plantas utilizadas en este trabajo, se sabe que varias de las características del suelo (pH, carbón orgánico, sodio, magnesio, estabilidad de agregados), donde se cultivan agaves, no se ven afectadas por la edad de los individuos (Bautista *et al.*, 2007), es decir, posiblemente habríamos obtenido resultados y tendencias similares en los parámetros evaluados en el tepetate, de haber usado plantas con mayor

grado de madures. Sin embargo, utilizar plantas jóvenes (3 meses), tuvo ventajas en cuanto al manejo de los individuos y permitió detectar posibles deficiencias nutrimentales durante las primeras etapas de desarrollo.

Finalmente, aunque en otros trabajos se han detectado deficiencias en plantas de agave, ante la falta de algún macronutriente en específico en la solución del suelo (Nikolaeva y Niño 2007), en realidad no se ha demostrado concluyentemente si la baja disponibilidad de nutrimentos en general, está asociada con una productividad reducida de estos organismos (Gobeille *et al.*, 2006). En nuestro caso, podemos recalcar que, si bien el agave puede crecer de manera satisfactoria en el tepetate roturado, produciendo agaves de buena calidad, aún sin enmiendas de ningún tipo, es necesaria la adición de material orgánico para obtener individuos económicamente más rentables (por alcanzar una talla mayor, con el aumento de peso asociado, producir más hojas y mayor volumen de jugo), y adicionalmente mejorar las características físicas y químicas del tepetate que permitan su uso para la plantación de agaves durante más tiempo.

VIII. CONCLUSIONES

Después de 14 meses de experimentación, bajo condiciones de invernadero, se llegó a las siguientes conclusiones:

- 1) El riego modificó algunos aspectos físicos (conductividad hidráulica, clases de tamaño de partícula, estabilidad de clases de tamaño de partícula) y químicos (Na^+ intercambiable, relación Sílice-Aluminio), del tepetate, con respecto a sus propiedades originales (T0).
- 2) Parámetros físicos del tepetate, como la densidad aparente, retención de agua a capacidad de campo, punto de marchitez y retención de agua disponible para las plantas, no fueron modificados por ninguno de los tratamientos utilizados (adición de estiércol, fertilizantes químicos, cultivo de agave).
- 3) La conductividad hidráulica se vio disminuida por el riego, el factor planta, y en menor grado, por el estiércol, respecto al valor medido en el testigo. La disgregación de fragmentos, el arrastre de partículas finas hacia el fondo y la obstrucción de los poros por sólidos orgánicos, parecen ser las causas de esta reducción.
- 4) Todos los tratamientos exhiben diferencias en cuanto a las clases de tamaño de partícula, con respecto al testigo (T0). En los tratamientos, la dispersión de los fragmentos de mayor tamaño (5.0 a 10 mm), por causa del riego, parece la responsable del aumento en la fracción menor a 2.0 mm. Por otro lado, entre tratamientos, aquellos con el factor agave, muestran un incremento en el porcentaje de CTP con diámetro mayor a 10 mm. El aumento de esta fracción, es imputable a los exudados y al empaquetamiento mecánico de las raíces.
- 5) Se incrementó la estabilidad de las clases de tamaño de partícula, con respecto al testigo (T0), en la fracciones con diámetro de 2.0 a 3.0 mm y mayores a 5.0 mm. Éste aumento en la estabilidad, se atribuye a la cementación causada por la precipitación de partículas finas y óxido de sílice, que se da entre eventos de riego, y que involucra constantes ciclos de humedecimiento-desecación.

- 6) La materia orgánica se incrementó de manera considerable en todos los tratamientos donde se incluyó el factor estiércol, y en menor medida en aquellos donde se incluyó el factor planta.
- 7) La planta (*Agave angustifolia* Haw), propició la acidificación del medio, la pérdida de bases intercambiables y la disminución de la capacidad de intercambio catiónico. Por otro lado, las bases y los sitios de intercambio contenidos en el estiércol, amortiguaron los cambios en aquellos tratamientos donde se incluyó ésta enmienda orgánica.
- 8) El riego causó alteraciones sobre el tepetate, no obstante, los tratamientos más intemperizados fueron aquellos con presencia de agave. La pérdida de elementos móviles (bases), fue el rasgo de intemperismo más notable.
- 9) Los índices de intemperismo propuestos para evaluar la meteorización del tepetate (IP, CIA, Bases/Alúmina, Bases/R₂O₃), fueron acertados, pues al considerar dentro de su formulación elementos altamente móviles, permitió detectar cambios, aún cuando el tiempo de experimentación fue relativamente corto.
- 10) La relación Sílice-Aluminio reveló pérdida de Sílice.
- 11) El fertilizante químico no mostró grandes influencias sobre los parámetros evaluados en el tepetate, tampoco afectó la producción de biomasa del agave. Es posible que una segunda aplicación de fertilizante al cabo de doce meses de experimentación, pudiera haber cambiado este hecho.
- 12) Todos los tratamientos funcionaron adecuadamente como sustrato para el establecimiento y desarrollo de *Agave angustifolia* Haw, no obstante, se obtiene mayor producción de biomasa con la adición de estiércol.
 - a) El uso de la enmienda orgánica amortiguó los cambios físicos y químicos que el tepetate sufrió bajo las condiciones experimentales.

- b) La calidad del jugo (y por tanto del agave), no varió entre tratamientos, resultando de buena calidad en todos los casos.
- c) El *Agave angustifolia* Haw se desempeñó adecuadamente como especie pionera sobre el tepetate fragmentado. Podrían establecerse cultivos permanentes de esta planta si se incluyen abonos orgánicos en su manejo.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo O., 1998, Morfogénesis de suelos con tepetate de un área del estado de México y su incorporación al proceso productivo: México, Facultad de Ciencias UNAM, Tesis Doctoral, 277 p.
- Acevedo O., Flores D., 1997, Efecto de Especies Vegetales en la Agregación y Disgregación de dos Tipos de Tepetates en el Estado de México, en Condiciones de Invernadero (resumen), en 3er Simposio Internacional Suelos Volcánicos Endurecidos: Ecuador, C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo, ORSTOM-UEPUCE-UCE., 178 – 184.
- Acevedo O., Ortiz L., Flores D., Velásquez A., Flores K., 2003, Caracterización Física y Química de Horizontes Endurecidos (Tepetates) en Suelos de Origen Volcánico del Estado de México: Agrociencia, 37, 435 – 449.
- Acevedo O., Velásquez A., Flores D., 2001, Agregación por Especies Vegetales y Abonos Orgánicos en Tepetates Fracturados en Condiciones De Invernadero: Terra, 19, 363 – 373.
- Agroproduce (Órgano informativo de Fundación Produce Oaxaca A.C.), 2007, Introducción Sistema Producto Maguey-Mezcal”: Oaxaca México, p. 3 – 4.
- Aguilera H., 1969, Geographic Distribution and Characteristics of Volcanic Ash Soil in México (resumen) en Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina: Costa Rica, Centro de Enseñanza e Investigación. Instituto Interamericano de Ciencias y Agricultura de la O. E. A., 12 – 16.
- Aguirre A., 2006, Química de los Suelos Ácidos, Templados y Tropicales: México, UNAM, p. 49-55, 66-68, 237-240.
- Alfaro G., Oleschko K., Meza M., 1992, Rasgos Micromorfológicos de los Tepetates de Hueyoxotla (Estado de México): Terra, 10 (número especial), 253 – 257.
- Amaury M., Arzate F., Mejía R., 2011, Capacidad Embriogénica De Callos Inducidos en Ejes Embrionarios Cigóticos de *Agave angustifolia* Haw: Revista Fitotecnia Mexicana, 34, 101 – 106.
- Arias H., 1992, Rehabilitación de Tepetates: una Alternativa para la Producción Agropecuaria y Forestal: Terra, 10 (número especial), 309 – 317.
- Arrizon J., Morel S., Gschaedler A., Monsan P., 2010, Comparison of the Water-Soluble Carbohydrate Composition and Fructan Structures of *Agave tequilana* Plants of Different Ages: Food Chemistry, 122, 123 – 130.
- Avilés C., 2013, Cultivo de girasol, *Helianthus annuus* L., en Tepetate Fragmentado Adicionado con Enmiendas Orgánicas e Inorgánicas: México, Facultad de Ciencias UNAM, Tesis de Licenciatura, 128 p.

- Bakhshandeh S., Khormali F., Dordipour E., Olamaei M, Kehl M., 2011, Comparing the Weathering of Soil and Sedimentary Palygorskite in the Rhizosphere Zone: Applied Clay Science, 54, 235 – 241.
- Báez A., Etchevers J., Hidalgo C., Prat C., Ordaz V., Núñez R., 2002, C Orgánico y P-Olsen en Tepetates Cultivados de México: Agrociencia, 36, 643 – 653.
- Báez A., Etchevers J., Prat C., Hidalgo C., 2007, Formation of Aggregates and Carbon Sequestration in Ameliorated Tepetates in the Río Texcoco Basin, Mexico: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 24, 487-497.
- Báez A., González A., Etchevers J., Prat C., Hidalgo C., 2010, Glomalina y Secuestro de Carbono en Tepetates Cultivados: Agrociencia, 44, 517 – 529.
- Barthés B., Roose E., 2002, Aggregate Stability as an Indicator of Soil Susceptibility to Runoff and Erosion; Validation at Several Levels: Catena, 47, p 133 – 149.
- Baumann J., Werner G., 1997, Nutrient Supply of Reclamated Indured Volcanic Ash Soils and Evaluation of Productivity with the QUEFTS-Model (resumen), en: 3er Simposio Internacional Suelos Volcánicos Endurecidos: Ecuador, C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo, ORSTOM-UEPUCE-UCE., 194 – 201.
- Bautista A., Carrillo R., Arnaud M., Robles C., León F., 2007, Soil Fertility Properties on *Agave angustifolia* Haw. Plantations: Soil & Tillage Research, 96, 342 – 349.
- Bautista M., García L., Salcedo R., Parra L., 2001, Azúcares en Agaves (*Agave tequilana* Weber), Cultivado en el Estado de Guanajuato: Acta Universitaria, 11, 33 – 38.
- Bhardwaj A., Goldstein D., Azenkot A., Levy G., 2007, Irrigation With Treated Wastewater Under Two Different Irrigation Methods; Effects on Hydraulic Conductivity of a Clay Soil: Geoderma, 140, 199–206.
- Bih V., Fontijn K., Ernst G., Kervyn M., Elburg M., Ranst E., Emmanuel C., 2012, Evaluating The Degree Of Weathering In Landslide-Prone Soils In The Humid Tropics; The Case Of Limbe, SW Cameroon: Geoderma, vol, 170, p. 378 – 389.
- Buckman H., Brady N., 1985, Naturaleza y Propiedades de los Suelos: México, Ed. UTEHA, 3ª reimposición, 590 p.
- Campos A., 1992, Los Tepetates de la Region de Xalapa, Veracruz (Mexico); Estructura de la Cubierta Pedológica: Terra, 10 (número especial), 226 – 232.
- Campos L., Baca G., Jaén D., Muratalla A., Acosta R., 2004, Fertirriego y Micorriza en Frambuesa Roja Cultivada en Tepetate: Agrociencias, 38, 75 – 83.
- Cañellas I., San Miguel A., 1996, Biomasa Subterránea de los Matorrales de *Quercus coccifera* en el Este de España: Investigación en Agricultura; Sistema de Recursos Forestales, 5, p 12.
- Covalada S., Pajares S., Gallardo J., Padilla J., Báez A., Etchevers J., 2009, Effect of Different Agricultural Management Systems on Chemical Fertility in Cultivated Tepetates of the Mexican Transvolcanic Belt: Agriculture, Ecosystems and Environment, 129, 422–427.

- Chávez L., Flores J., Kharissov B., 2012, Recycling of Ash from Mezcal Industry; A Renewable Source of Lime: *Chemosphere*, 81, 633 – 638.
- Chávez L., Hinojosa M., 2010, Bagasse From the Mezcal Industry as an Alternative Renewable Energy Produced in Arid Lands: *Fuel*, 89, 4049 – 4052.
- Darmody R., Thorn C., Allen C., 2005, Chemical Weathering and Boulder Mantles, K7rkevagge, Swedish Lapland: *Geomorphology*, 67, 159–170.
- Deneff K., Six J., Bossuyt H., Frey S., Elliot E., Merck R., Paustian K., 2001, Influence of Dry-Wet Cycles on the Interrelationship Between Aggregate, Particulate Organic Matter, and Microbial Community Dynamics: *Soil Biology and Biochemistry*, 33, 1599 – 1611.
- Díaz J., 2001, Influencia de Especies Vegetales, Abono y Fertilizante, Sobre Algunas de las Características Químicas de Tepetate Fragmentado, en Condiciones de Campo: México, Facultad de Ciencias, UNAM, Tesis de Licenciatura, 82 p.
- Díaz-Avelar J., Barrios J., Jiménez B., 2004, Effect of the Application of Acid Treated Biosolids on Marigold (*Tagetes erecta*) Development: *Water Science and Technology*, 50, 33 – 40.
- Díaz J., Solleiro E., Sergey S., Cabadas H., 2010, Paleosuelos y Tepetates del Glacis de Buenavista Morelos (México); Testigos de Eventos Climáticos de la Transición Pleistoceno-Holoceno: *Boletín de la sociedad Geológica Mexicana*, 62, 469-486.
- Diódoro G., 1993, Los agaves en México: México, Universidad Autónoma de Chapingo, 252 p.
- dos Santos W., Dias D., Paranhos E., das Virgens C, de Souza F., 2011, Biosorption of Pb(II) and Cd(II) Ions by *Agave sisalana* (sisal fiber): *Microchemical Journal*, 97, 269 – 273.
- Dubroeuq D., 1992, Los Tepetates de la Region de Xalapa, Veracruz (Mexico); un Endurecimiento de Origen Pedológico: *Terra*, 10 (número especial), 233 – 240.
- Duran J., 2005, Diagnostico del Sistema Producto Maguey Mezcalero en San Luis Potosí: San Luis Potosí, México, Comité Estatal del Sistema Producto Maguey Mezcalero, 77 p.
- Duzgoren N., Aydın A., Malpas J., 2002, Re-assessment of Chemical Weathering Indices; Case Study on Pyroclastic Rocks of Hong Kong: *Engineering Geology*, 63, 99 – 119.
- Etchevers J., y Brito H., 1997, Levantamiento Nutritional de los Tepetates de México y Tlaxcala (resumen), en 3er Simposio Internacional Suelos Volcánicos Endurecidos: Ecuador. C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo, ORSTOM-UEPUCE-UCE., 194 – 201.
- Etchevers J., Hidalgo C., Prat C., Quantin P., 2004, Tepetates of México, *Encyclopedia of Soil Science*, New York, USA, Ed. Marcel Dekker.
- Etchevers J., López R., Zebrowski C., Peña P., 1992, Características Químicas de Tepetates de Referencia de los Estados de México y Tlaxcala, México: *Terra*, 10 (número especial), 171-177.

- Etchevers J., Perez M., Navarro G., 1997, Dinámica de la Materia Orgánica y el N en Tepetates Habilitados para la Producción Agrícola (resumen), *en* 3er Simposio Internacional Suelos Volcánicos Endurecidos: Ecuador, C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo, ORSTOM-UEPUCE-UCE., 213 – 224.
- Fechter U. y Flores G., 1997, Propiedades Físicas de Suelos Volcánicos Endurecidos (Tepetate T3) Después de su Rehabilitación en Tlaxcala (México), (resumen), *en* 3er Simposio Internacional Suelos Volcánicos Endurecidos: Ecuador, C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo, ORSTOM-UEPUCE-UCE., 162-169.
- Finlay R., Wallander H., Smits M., Holmstrom S., Van Heesd P., Liane B., Roslinga A., 2009, The Role of Fungi in Biogenic Weathering in Boreal Forest Soils: *Fungal Biology Reviews*, 23, 101 – 106 .
- Flach K., Nettleton W., Chadwick O., 1992, The Criteria of Duripans in the U.S. Soil Taxonomy and the Contribution of Micromorphology to Characterize Silica Indurated Soils: *Terra*, 10 (número especial), 34– 45.
- Flores D., Alcalá R., González A., Gama J., 1992, 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, UNAM*, 10, 151-163.
- Flores D., Alcalá R., González A., Gama J., 1996, Duripans in Subtropical and Temperature Subhumid Climate of the Trans-Mexico Volcanic Belt: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, UNAM*, 13, 228-239.
- Flores D., González A., Alcalá R., Gama J., 1991, Los Tepetates: *Revista de Geografía, Instituto de Estadística Geografía e Informática*, 3, 37 - 42.
- Flores D., Muñiz C., Galicia M., Cerrato R., Zenteno G., 2011, Enmiendas Orgánicas y Durazno, *Prunus persica* (L.) Batsch, en el Mejoramiento de una Capa Endurecida, Tepetate tipo Duripán: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63, 479-486.
- Flores S. D., Pérez M., Navarro H., 2004, Rehabilitación Agroecológica de Suelos Volcánicos Endurecidos, *Experiencias en el Valle de México: LEISA*, 19, 1 - 4.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (FAO-PNUMA), 1980, Metodología Provisional para la Evaluación de la Degradación de los Suelos: Tome, 86. *Consultado en:* Gama J., Solleiro R., Flores D., Sedov S., Cabadas H., Díaz J., 2007, Los Tepetates y su Dinámica Sobre la Degradación y el Riesgo Ambiental: el caso del Glacis de Buenavista, Morelos: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, tomo LIX, 133-145.
- Gama J., Solleiro R., Flores D., Sedov S., Cabadas H., Díaz J., 2007, Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del Glacis de Buenavista, Morelos: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, tomo LIX, 133 – 145.
- García A., 2001, Agregación en Tepetate por Influencia de Especies Vegetales, Abono y Fertilizante en Condiciones de Invernadero: México, Facultad de Ciencias, UNAM, Tesis de Licenciatura, 85 p.

- García A., Flores D., García N., Ferrera R., 2008, Efecto De Enmiendas Orgánicas, Higuera Y Micorriza Sobre Las Características De Un Tepetate: *Terra Latinoamericana*, 26, 309 - 315.
- García A., Flores D., García N., Ferrera R., Velázquez A., 2007, Habilitación De Un Tepetate Por Efecto De Mejoradores Biológicos: *Revista Agrociencia*, 41, 723-731.
- García Ab., 1998, Con sabor a Maguey. Guía de la Colección Nacional de Agaváceas y Nolináceas del Jardín Botánico del Instituto de Biología: México, UNAM, p. 4,9, 23, 31-35.
- García Ab., 2007, Los Agaves de México: *Ciencias*, 87, 14 – 23.
- García Ab., Chiang F., 2003, The Confusion of *Agave vivipara* L. and *A. angustifolia* Haw., Two Distinct Taxa: *Brittonia*, 55, 82 – 87.
- García E., 1988, Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlas a las condiciones de la República Mexicana): México, Instituto de Geografía, UNAM, 246 p.
- Gobeille A., Yavitt J., Stalcup P., Valenzuela A., 2006, Effects of Soil Management Practices on Soil Fertility Measurements on *Agave tequilana* Plantations in Western Central Mexico: *Soil & Tillage Research*, 87, 80 –88.
- Gonçalves R., Folegatti M., Gloaguen T., Libardi P., Montes C., Lucas Y., Dias C., Melfi A., 2007, Hydraulic Conductivity of a Soil Irrigated With Treated Sewage Effluent: *Geoderma*, 139, 241–248.
- Guerreo G., 1996, El Suelo, los Abonos y la Fertilización de los Cultivos: España, Ediciones Mundi Prensa, 23 – 27.
- Hall K., Thorn C., Sumner P., 2012, On the Persistence of “Weathering: Geomorphology, 149,. 1 – 10.
- Haulon M., Werner G., Flores G., Vera A., Felix P., 2007, Assesment of Erosion Rates During Rehabililtation of Hardened Volcanic Soils (Tepetates) in Tlaxcala: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24, 498 – 509.
- Hernández X., 1987, Etnobotánica de Tlaxcala: México. *Consultado en:* Islas C., 1998, Morfogénesis de Capas Endurecidas del Cuaternario en el Noreste del Estado de Morelos: México, Facultad de ciencias, UNAM, Tesis de maestría, 177 p.
- Herrera S., 2000, Efecto de Especies Frutales y Abono Orgánico en la Agregación de un Tepetate Fracturado Durantes Seis Meses en Condiciones de Invernadero: México, Facultad de Ciencias, UNAM, Tesis de Licenciatura, 65 p.
- Herrick J., 2000, Soil Quality: an Indicator of Sustainable Land management?: *Applied Soil Ecology*, 15, 75–83
- Hessmann R., 1992, Micromorphological Investigations on “Tepetate” Formation in the “Toba”- Sediments of the State of Tlaxcala (México): *Terra*, 10 (número especial), 145 – 150.

- Hidalgo C., Etchevers J., Martínez A., Yee H., Calderon H., Vera R., Matus F., 2010, Mineralogical Characterization of the Fine Fraction (<math><2 \mu\text{m}</math>) of Degraded Volcanic Soils and Tepetates in México: Applied Clay Science, 49, 348 – 358.
- Hidalgo C., Quantin P., Zebrowski C., 1992, La Cementación de los Tepetates: Estudio de la Silificación: Terra, 10 (número especial), 192 – 201.
- Hillel D., 1998, Environmental Soil Physics: USA, Ed. ACADEMIC PRESS, 771 p.
- Imaz M., Virto I., Bescansa P., Enrique A., Fernandez O., Karlen D., 2011, Soil Quality Indicator Response to Tillage and Residue Management on Semi-arid Mediterranean Cropland: Soil & Tillage Research, 107, 17–25.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2011, Anuario estadístico del estado de Morelos, INEGI, 13 – 18.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007, Synthesis Report, Spain, 73 p.
- Iñiguez G., Díaz R., Sanjuan R., Anzaldo J., Rowell R., 2001, Utilization of By-Products From the Tequila Industry. Part 2: Potential Value of *Agave tequilana* Weber azul Leaves: Bioresource Technology, 77, 101 – 108.
- Izquierdo T., 2004, Efecto de Composta, Vermicomposta y Fertilizante en la Producción de Cempasúchitl (*Tagetes erecta*) y la Formación de Agregados a Partir de un Tepetate Fragmentado: México, Facultad de Ciencias, UNAM, Tesis de Licenciatura, 110 p.
- Jackson M., 1970, Análisis químico de suelos: Barcelona, España, Edit. Omega, 93 – 101, 282 - 286.
- Kemper W., Rosenau R., 1986, Aggregate Stability and Size Distribution, Consultado en: Avilés C., 2013, Cultivo de girasol, *Helianthus annuus L.*, en Tepetate Fragmentado Adicionado con Enmiendas Orgánicas e Inorgánicas: México, Facultad de Ciencias, UNAM, Tesis de Licenciatura, 128 p.
- Klute A., 1986, Methods of soil Analysis. Part 1- Physical and mineralogical methods: Madison Wis., American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 422 - 442.
- Labrador M., 1996, La Materia Orgánica en los Agroecosistemas: España, Ediciones Mundi Prensa, 121 – 128.
- Lal R., Shukla M., 2004, Principles Of Soil Physics: USA, Ed. Marcel Dekker Inc., 682 p.
- Macias J., Carrasco G., Siebe C., 1995, Zonificación de Peligros Volcánicos del Popocatépetl. Consultado en: Sistema Nacional de Protección Civil. Centro Nacional de Prevención de Desastres – Universidad Nacional Autónoma de México: México, Volcán Popocatépetl Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994 – 1995. Capítulo III. 79 – 92.
- Marinari S., Mancinelli R., Campiglia E., Grego S., 2006, Chemical and Biological Indicators of Soil Quality in Organic and Conventional Farming Systems in Central Italy: Ecological Indicators, 6, 701–711.

- Martin M., Peters C., Palmer M., Illsley C., 2011, Effect of Habitat and Grazing on the Regeneration of Wild *Agave cupreata* in Guerrero, Mexico: Forest Ecology and Management, 262, 1443 – 1451.
- Martínez J., Peña A., 2009, Characterization of Five Typical Agave Plants Used To Produce Mezcal through Their Simple Lipid Composition Analysis by Gas Chromatography: Journal of Agricultural and Food Chemistry, 57, 1933 – 1939.
- Miehlich G., 1984, Chronosequenzen und Anthropogene Veränderungen Andesitischer Vulkanischböden in drei Klimastufen eines Randtropischen Gebirges (Sierra Nevada de México)”: Alemania, Universidad de Hamburgo, Tesis Doctoral, 402 p. *Consultado en:* Etchevers J., López R., Zebrowski C., Peña P., 1992, Características Químicas de Tepetates de Referencia de los Estados de México y Tlaxcala, México: Terra, 10 (número especial), 171-177.
- Miehlich G., 1992, Formation and Properties of Tepetate in the Central Highlands of México: Terra, 10 (número especial), 137 – 144.
- Moreno S., Esqueda M., Martínez J., Palomino G., 2007, Tamaño Del Genoma Y Cariotipo en *Agave angustifolia* Y *A. rhodacantha* de Sonora, México: Revista Fitotecnia Mexicana, 30, 13 – 23.
- Munroe J., Farrugia G., Ryan P., 2007, Parent Material and Chemical Weathering in Alpine Soils on Mt. Mansfield, Vermont, USA: Catena, 70, 39 – 48.
- Muñoz C., 2006, Mejoramiento de la Calidad de un Tepetate por Influencia de Enmiendas Orgánicas y una Especie Vegetal (*Prunus persica* L. Batsch) en Condiciones de Invernadero: México, Instituto de Geología, UNAM, Tesis de Maestría, 87 p.
- Nava V., Sánchez J., Olvera Y., Leyte A., 1992, Rehabilitación del Tepetate Mediante el Manejo Tradicional en Tlaxcala-México: Terra, 10 (número especial), 460 – 464.
- Nikolaeva V., y Niño de la C., 2007, Deficiencia Inducida de Elementos Nutritivos en el Cultivo de Agave, p. 89 – 116. *Consultado en:* Rulfo F., Pérez F., del Real I., Byerly K., (ed.), 2007, Conocimiento y Prácticas Agronómicas para la Producción de *Agave tequilana* Weber en la Zona de Denominación de Origen del Tequila. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias: México, Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro Libro técnico núm 4, 195 p.
- Nimlos T., 1989, The Density and Strength of Mexican Tepetate (Duric Materials): Soil Science, 147, 23 – 27.
- Nimlos T., Hillery P., 1990, The Strength/Moisture Relations and Hydraulic Conductivity of Mexican Tepetate: Soil Science, 150, 425-430.
- NORMEX 2005, Norma Mexicana NMX-V-006-NORMEX-2005- Bebidas alcohólicas- Determinación de Azúcares Reductores Directos y Totales Métodos de Ensayo (Prueba): México, Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación S. C. 30 p.
- Nuñez H., Rodríguez L., Khanna M., 2011, Agave for Tequila and Biofuels: an Economic Assesment and Potential Opportunities: Global Change Biology Bioenergy 3, 43 – 57.

- Oades J., 1993, The Role of Biology in the Formation, Stabilisation and Degradation of Soil Structure: *Geoderma* 56, 377 – 400.
- Oleschko, K., Figueroa S., Miranda M., Vuelas M., Solleiro E., 2000, Mass fractal dimensions and some selected physical properties of contrasting soils and sediments of Mexico: *Soil and Tillage Research*, 55, 43-61.
- Oleschko K., Zebrowski C., Quantin P., Fedoroff N., 1992, Patrones Micromorfológicos de Organización de arcillas en Tepetates: *Terra*, 10 (número especial), 183 – 191.
- Pajares S., Gallardo J., Etchevers J., 2010, Indicadores Bioquímicos en Suelos de un Transecto Altitudinal en el Eje Neovolcánico Mexicano: *Agrociencia*, 44, 261 – 274.
- Palviainen M., Starr M., Johan C., 2012, The Effect of Site Fertility and Climate on Current Weathering in Finnish Forest Soils: Results of a 10 – 16 Year Study Using Buried Crushed Test - Rock Material: *Geoderma* Vol 183, p. 58 – 66.
- Peña A., Díaz L., Medina A., Labastida C., Capella S., Vera L., 2004, Characterization of Three *Agave* Species by Gas Chromatography and Solid-Phase Microextraction–Gas Chromatography–Mass Spectrometry: *Journal of Chromatography*, 131 – 136.
- Peña D., Zebrowski C., 1992, Los Suelos y Tepetates de la Vertiente Occidental de la Sierra Nevada: *Terra*, 10 (número especial), 151– 155.
- Pérez J., Del Real J., 2007, Conocimiento y Prácticas Agronómicas para la Producción de *Agave tequilana* Weber en la Zona de Denominación de Origen del Tequila: Jalisco México, Prometeo Editores, Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro, Libro Técnico núm. 4, 195 p.
- Pimentel L., 1992, Como Hacer Productivos a los Tepetates en México: *Terra*, 10 (número especial), 293 – 301.
- Plancarte A., 2006, Efecto de abonos orgánicos e higuera, *Ficus carica* L., en la Agregación y las Principales Propiedades Químicas de un Tepetate Fragmentado: México, Facultad de Ciencias, UNAM, Tesis de Licenciatura, 112 p.
- Porta J., López C., Roquero J. 1999, Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente: España, Ed. Mundi prensa. 190 - 240.
- Prat, C., Ordaz, V., Rugama, J.A., 2003, Impacto de la Roturación y del Manejo Agronómico de un Tepetate Sobre su Estructura: *Terra Latinoamericana*, 21, 109-115.
- Prat C., Quantin P., 1992, Origen y Genesis del Talpetate: *Terra*, 10 (número especial), 267– 282.
- Quantin P., 1992, Endurecimiento de Materiales Volcánicos Piroclásticos en América Latina: Procesos Geológicos y Edafológicos: *Terra*, 10 (número especial), 24 – 33.
- Quantin P., Arias A., Etchevers J., Ferrera R., Oleschko K., Navarro A., Werner G., Zebrowski C., 1993, Tepetates de México: Caracterización y Habilitación para la Agricultura (informe científico final del proyecto TS2-A 212-C CEE/ORSTOM): *Terra*, 11, (núm especial), 3-69.

Consultad en: Acevedo A., 1998, Morfogénesis de Suelos con Tepetate de un Área del Estado de México y su Incorporación al Proceso Productivo: México, Facultad de Ciencias, UNAM, Tesis Doctoral 277 p.

- Quantin P., Zebrowski C., Delaune M., Hidalgo C., 1992, El Material Original de los Tepetates t2 y t3 de la Región de Texcoco (México): ¿Loess o Cineritas?: Terra, 10 (número especial), 178 – 182.
- Reynolds W., Bowman B., Drury C., Tan C., Luc X., 2002, Indicators of Good Soil Physical Quality: Density and Storage Parameters: Geoderma, 110, 131– 146.
- Rodríguez-Fuentes H., Rodríguez Absi J., 2002, Métodos de Análisis de Suelos y Plantas, Criterios de Interpretación: México, Ed. Trillas, México, 196 p.
- Romero M., 1997, Abonos Orgánicos y Químicos en Producción Sanidad y Absorción Nutricional de Papa y Efecto en el Suelo: México, Colegio de Postgraduados, Tesis de Maestría, p.
- Sarabia G., Solleiro E., Sedov S., Gama J., 2002, Tepetate del glacis de Buenavista, Morelos: interacción de procesos geomorfológicos y pedogenéticos: Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM Núm. 48, pp. 76-89.
- Schaller M., Blum J., Ehlers T., 2009, Combining Cosmogenic Nuclides and Major Elements from Moraine Soil Profiles to Improve Weathering Rate Estimates: Geomorphology, 106, 198 – 205.
- Schoenholtz S., Miegroet H., Burger J., 2000, A Review of Chemical and Physical Properties as Indicators of Forest Soil Quality: Challenges and Opportunities: Forest Ecology and Management, 138, 335 – 356.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT, 2002, Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, Diario Oficial (segunda sección), México, p 85.
- Shao J., Yang S., Li C., 2012, Chemical Indices (CIA and WIP) as Proxies for Integrated Chemical Weathering in China: Inferences from Analysis of Fluvial Sediments: Sedimentary Geology, 265, 110–120.
- Shukla M., Lal R., Ebinger M., 2006, Determining Soil Quality Indicators by Factor Analysis: Soil & Tillage Research, 87, 194–204
- Soil Survey Staff USDA, 2010A, Claves para la Taxonomía de Suelos: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, undécima edición, 365.
- Souria B., Watanabe M., Sakagami K., 2006, Contribution of Parker and Product Indexes to Evaluate Weathering Condition of Yellow Brown Forest Soils in Japan: Geoderma, 130, 346– 355.
- Sparks D., 1996, Methods of soil Analysis. Part 3- Chemical methods: Madison Wis., American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Book Series: 5, 1390.
- Sparks D., 2003, Environmental Soil Chemistry: USA, Academic Press, 352 p.

- Sverdrup H., 2009, Chemical Weathering of Soil Minerals and the Role of Biological Processes: *Fungal Biology Reviews*, 23, 94 – 100.
- Trinidad A., 1987, El Uso de Abonos Orgánicos en la Producción Agrícola: México, Colegio de Postgraduados, Cuadernos de Edafología 10.
- Unger P., 1996, Soil Bulk Density, Penetration Resistance, and Hydraulic Conductivity Under Controlled Traffic Conditions: *Soil and Tillage Research*, 37, 67-75.
- Valdez M., 1970, Características Morfológicas y Mineralógicas de los Suelos de Tepetate de la Cuenca de México: México, Colegio de Postgraduados, Tesis de Maestría, 190 p.
- Vargas O., Zizumbo D., Martínez J., Coello J., Colunga P., 2009, Diversity and Structure of Landraces of *Agave* Grown for Spirits Under Traditional Agriculture: A Comparison with Wild Populations of *A. angustifolia* (Agavace) and Commercial Plantations of *A. tequilana*: *American Journal of Botany*, 96, 448 – 457.
- Velázquez A., 2002, Especies Vegetales, Abono y Fertilizante: su Influencia en la Calidad de un Tepetate de Tetela del Volcán Estado de Morelos: México, Facultad de Ciencias, UNAM, Tesis de doctorado, 126 p.
- Velázquez A., Flores D., 1997, Formación de Agregados Estables a partir de un Duripán del Estado de Morelos (México) por parte de Especies Vegetales Perennes en Condiciones de Invernadero (resumen), en 3er Simposio Internacional Suelos Volcánicos Endurecidos: Ecuador, C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo, ORSTOM-UEPUCE-UCE., 170 – 177.
- Velázquez A., Flores D., Acevedo O., 2001, Formación de Agregados en Tepetate por Influencia de Especies Vegetales: *Agrociencia*, 35, 311-320.
- Velázquez A., Flores D., Etchevers J., García N., 2008, Materia Orgánica en Tepetate Bajo Cultivo de Higuera y Pasto Acondicionado con Estiércol y Fertilizante: *Agrociencia*, 42, 11 – 19.
- Velázquez R., 1997, Disgregación, Alteración y Agregación de dos Niveles de Fracturación de Tepetates del Estado de Morelos por Especies Vegetales Perennes en Condiciones de Invernadero: México, Facultad de Ciencias, UNAM, Tesis de Maestría 147 p.
- Werner G., 1992, Suelos Volcánicos Endurecidos (Tepetates) en el Estado de Tlaxcala: Distribución, Rehabilitación, Manejo y Conservación: *Terra*, 10 (número especial), 318 – 331.
- Williams B., 1972, Tepetate in Valley of México: *Annals of the Assn. of An. Geog.* 62, 618 – 623.
- Williams B., 1992, Tepetate in 16th Century and Contemporary Folk Terminology Valley of México: *Terra*, 10 (número especial), 483 – 493.
- Youssef A. y Chino M., 1989, Root-Induced Changes in the Rhizosphere of Plants I. pH Changes in Relation to the Bulk Soil: *Soil Science and Plant Nutrition*, 35, 461 – 468.
- Zebrowski C., 1992, Los suelos volcánicos endurecidos en America Latina: *Terra*, 10 (número especial), 15 – 23.

Recursos En Línea

- INIFAP, 2000, Fertilización del maguey mezcalero (en línea): México, INIFAP, Desplegable para Productores No. 4, disponible en: <<http://www.inifap.gob.mx/>> consultado entre el primero de junio del 2012 y el quince de noviembre del 2012.
- Flores L., Alcalá R., 2010, Manual de Procedimientos Analíticos, Laboratorio de Física de Suelos: México, Instituto de Geología, UNAM, disponible en: <<http://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/manualLFS.pdf>> consultado entre el treinta de agosto del 2012 y el diez de diciembre del 2012.
- Soil Survey Staff USDA, 2010B, Title 430 - National Soil Survey Handbook, Part 618 – Soil Properties and Qualities, Subpart A – General Information: USA, USDA, disponible en: <<http://soils.usda.gov/technical/handbook/download.html>> consultado entre el primero de septiembre del 2012 y el treinta de noviembre del 2012.

IX. APÉNDICES

Apéndice I. Condiciones Ambientales en el Invernadero

		Temperatura	Humedad	Radiación Solar
		° C	%	W/m ²
Octubre	2010	19.8	51.6	25.7
Noviembre	2010	18.5	55.9	17.1
Diciembre	2010	18.6	51.1	15.3
Enero	2011	16.9	51.5	17.3
Febrero	2011	19.2	40.3	21.3
Marzo	2011	19.5	39.6	31.2
Abril	2011	22.0	44.3	35.2
Mayo	2011	23.3	44.6	28.3
Junio	2011	22.5	49.6	29.6
Julio	2011	19.8	70.1	20.1
Agosto	2011	20.7	62.8	27.8
Septiembre	2011	21.2	60.3	27.5
Octubre	2011	20.5	55.4	26.7
Noviembre	2011	18.6	51.9	18.1

Los valores son medias de n≈30.

Apéndice II. Contenido nutrimental del estiércol vacuno

Parámetros		Valores
pH	(relación 1:2)	8.0
Nitrógeno total	(%)	1.5
Fósforo	(%)	0.6
Potasio	(%)	2.5
Calcio	(%)	3.2
Magnesio	(%)	0.8
Sodio	(%)	1.6
Relación C/N		26.0

Tabla tomada de Romero M., 1997.

Apéndice III. Figuras relativas a las condiciones y otras particularidades experimentales

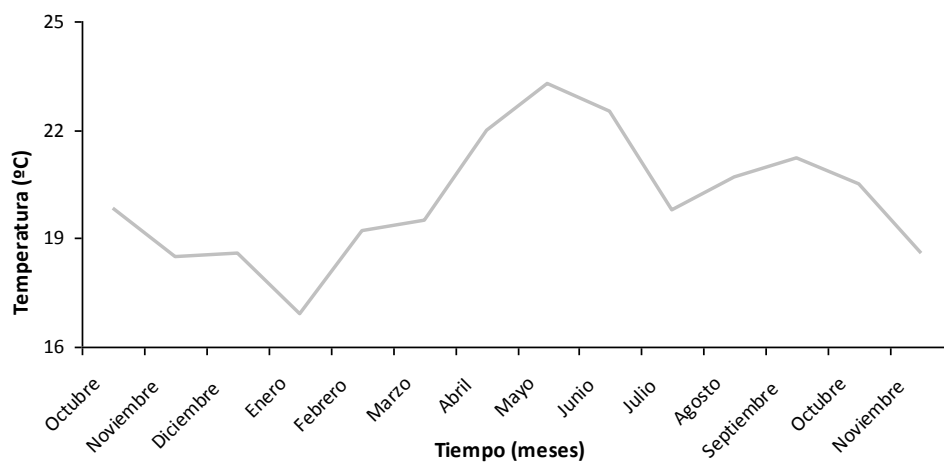


Figura 25. Representación gráfica de la temperatura (°C), durante la fase experimental en invernadero (14 meses, desde Octubre del 2010, hasta Noviembre del 2011). Se muestra el valor promedio mensual ($n \approx 30$).

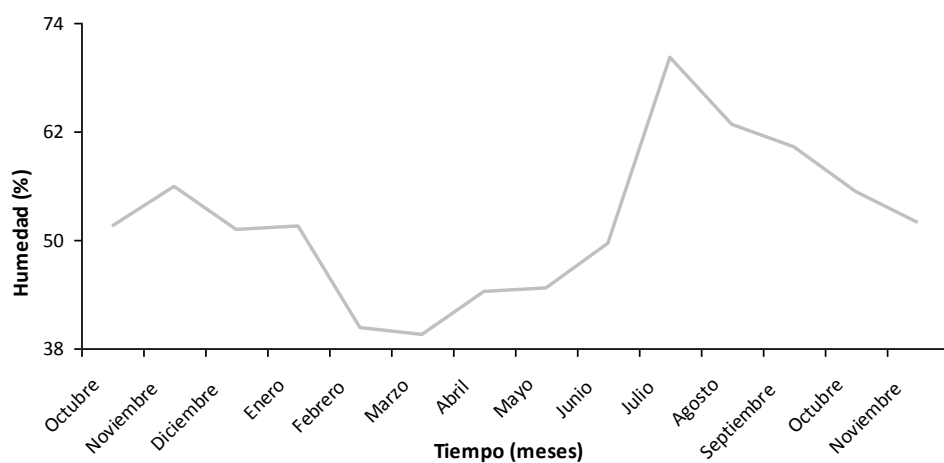


Figura 26. Representación gráfica de la humedad (%), durante la fase experimental en invernadero (14 meses, desde Octubre del 2010, hasta Noviembre del 2011). Se muestra el valor promedio mensual ($n \approx 30$).

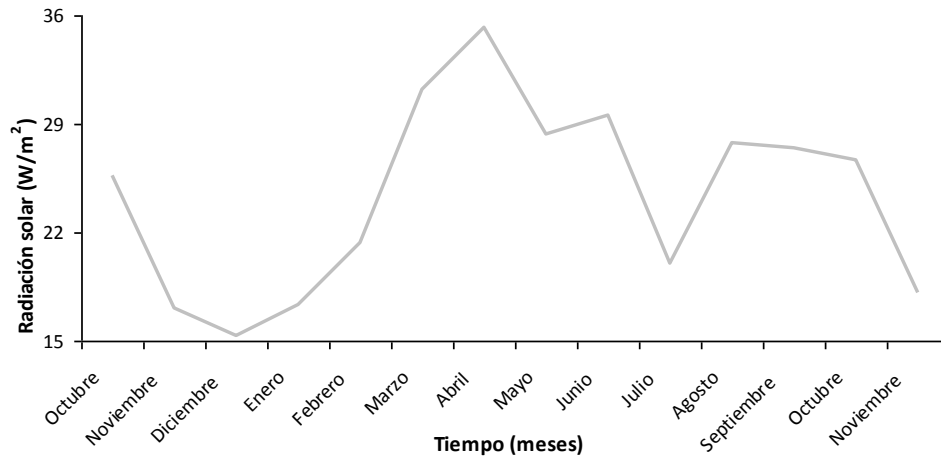


Figura 27. Representación gráfica de la radiación solar (W/m^2), durante la fase experimental en invernadero (14 meses, desde Octubre del 2010, hasta Noviembre del 2011). Se muestra el valor promedio mensual ($n \approx 30$).



Figura 28. Tepetate recolectado en el municipio Tetela del Volcán, al noreste del estado de Morelos ($18^\circ 52' 30'' \text{ N}$ y los $98^\circ 57' 30'' \text{ O}$).



Figura 29. Instalación de las unidades experimentales en el invernadero del Instituto de Geología, UNAM.



Figura 30. (A) Empaquetamiento de las partículas de tepetate por parte de las raíces del agave. (B) Raíz del agave libre de las partículas del tepetate. (C) Medición del largo máximo de la raíz del agave. Las partículas de tepetate se observaban sujetas y compactadas por las raíces, éstas a su vez, habían abarcado la totalidad de la unidad experimental.