



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Influencia del sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), con
abono y o el fertilizante químico sobre la alteración de un
tepetate**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G O

P R E S E N T A:

LUIS ANTONIO GARRIDO OROPEZA

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. JORGE ENRIQUE GAMA CASTRO

2015



Ciudad Universitaria, D. F.



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

Garrido
Oropeza
Luis Antonio
70413056
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Biología
41002460-1

2. Datos del tutor

Doctor
Jorge Enrique
Gama
Castro

3. Datos del sinodal 1

Dra.
Martha Juana
Martínez
Gordillo

4. Datos del sinodal 2

Dra.
Nathalie Roberte
Chantal
Cabirol

5. Datos del sinodal 3

Dra.
Amada Laura
Reyes
Ortigoza

6. Datos del sinodal 4

Dra.
Lucy Natividad
Mora
Palomino

7. Datos del trabajo escrito

Influencia del sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), con abono y o el fertilizante químico sobre la alteración de un tepetate.
102 p.
2015

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ciencias, por haberme brindado la educación y dado la oportunidad de desarrollarme en el ámbito académico y personal.

Al Instituto de Geología, así como al Departamento de Edafología, por otorgarme, a través de la Directora del Instituto, Dra. Elena Centeno García, del Secretario Académico, Dr. Ricardo Barragán Manzo, y de la Jefa del Departamento de Edafología, Blanca Prado Pano, el valioso apoyo que permitió la consecución de esta tesis.

Al Dr. David Flores Román, por su dirección al inicio de este trabajo, por brindarme siempre su conocimiento y comprensión.

Al Dr. Jorge Enrique Gama Castro a quien le debo un agradecimiento muy especial por ser quien me permitió continuar y concluir con el desarrollo de este trabajo, por su absoluta disposición, paciencia y gran dirección.

A los miembros del jurado: Dra. Martha Juana Martínez Gordillo, Dra. Nathalie Roberte Chantal Cabirol, Dra. Amada Laura Reyes Ortigoza y Dra. Lucy Natividad Mora Palomino, por su notable dedicación en la revisión de este trabajo y sus valiosas observaciones y acertados comentarios.

A la M. en C. Iris Suarez Quijada y al Invernadero del Instituto de Geología de la UNAM, por las facilidades que me brindaron en el uso de las instalaciones, así como por su amabilidad, atención y orientación.

*A José Luis Vigosa Mercado, a la Dra. Rosa María Fonseca Juárez y al Laboratorio de Plantas Vasculares de la facultad de Ciencias, UNAM. A quienes les agradezco por su valioso apoyo en la determinación taxonómica de la especie vegetal (*Sorghum bicolor* (L.) Moench).*

A la Dra. Teresa Pi Puig, por la determinación e interpretación mineralógica en muestras experimentales utilizadas en esta tesis, las cuales fueron analizadas por difracción de rayos x.

Al M. en C. Jaime Díaz Ortega y al taller de laminación del Instituto de Geología de la UNAM, por las facilidades y apoyo brindado en la realización de láminas delgadas, así como su Interpretación del análisis micromorfológico y morfométrico en muestras seleccionadas.

A la Dra. Carolina Jasso Castañeda, por su apoyo y todos sus valiosos comentarios respecto a esta tesis.

Un agradecimiento muy especial al M. en C. Arturo Atilano Alvarado quien siempre me brindó su apoyo de principio a fin, quien fue un maestro y guía durante la elaboración de este trabajo.

Al doctorante Mario Cayetano y a la Biol. Carolina Avilés por estar siempre en la mejor disposición de brindarme su ayuda.

A todos aquellos que a lo largo del camino, fueron un apoyo, motivación y compañía. A quienes formaron parte de mis ilusiones, sueños y alegrías.

INDICE

1. RESUMEN.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	3
3. MARCO TEÓRICO.....	5
3.1. Tepetates.....	5
3.1.1. Definición y marco histórico.....	5
3.1.2. Características diagnósticas.....	5
3.1.3. Tipos morfogenéticos.....	7
3.1.4. Génesis de los tepetates.....	7
3.1.4.1. Origen geológico.....	8
3.1.4.2. Origen pedológico.....	8
3.1.5. Distribución a nivel nacional.....	8
3.1.6. Importancia.....	9
3.2. Degradación del suelo.....	9
3.2.1. La degradación del suelo como factor formador de tepetates.....	9
3.2.2. La tepetización y su dinámica.....	10
3.3. La habilitación como respuesta a la degradación.....	10
3.3.1. Habilitación.....	10
3.3.2. Antecedentes.....	11
3.3.3. Metodologías para la habilitación de los tepetates.....	12
3.3.4. Influencia de la vegetación/cultivos.....	13
3.4. Calidad del suelo y su evaluación.....	14
3.4.1. Definición.....	14
3.4.2. Evaluación.....	15
3.4.3. Índices de calidad.....	15
3.4.3.1. Indicadores físicos de la calidad del suelo.....	16
3.4.3.2. Indicadores químicos de la calidad del suelo.....	19
3.5. Estrategias para mejorar la calidad del suelo.....	22
3.5.1. Enmiendas orgánicas – estiércol.....	22
3.5.2. Fertilizantes minerales o inorgánicos.....	24

3.5.3. (<i>Shorgum bicolor</i> (L.) Moench) como variable experimental.....	25
4. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	26
5. JUSTIFICACIÓN.....	27
6. OBJETIVOS.....	28
7. HIPÓTESIS.....	29
8. METODOLOGÍA.....	30
8.1. Observaciones y ubicación del material (tepetate).....	30
8.2. Diseño experimental en invernadero.....	31
8.3. Descripción del experimento.....	32
8.4. Análisis generales de laboratorio.....	33
8.5. Análisis selectos de laboratorio.....	34
8.5.1. Óxidos de elementos mayores.....	35
8.5.2. Índices de intemperismo.....	35
8.5.3. Análisis mineralógico. Mineralogía de la muestra total y de la fracción de arcilla fina menor a 2 μm	35
8.5.4. Análisis micromorfológico y morfométrico de agregados.....	36
8.6. Selección de los índices de calidad.....	37
8.7. Determinación de la biomasa del sorgo.....	37
8.8. Análisis estadísticos.....	37
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
9.1. Análisis de las características químicas del tepetate.....	38
9.1.1. Potencial de hidrogeno (pH) en agua.....	38
9.1.2. Materia orgánica.....	40
9.1.3. Capacidad de intercambio catiónico (CIC).....	42
9.1.4. Porcentaje de saturación de bases.....	43
9.1.5. Concentración de cationes intercambiables.....	44
9.1.6. Contenido porcentual de cationes intercambiables.....	49
9.1.7. Relación $\text{Ca}^+:\text{Mg}^{++}$	51
9.1.8. Conductividad eléctrica.....	52
9.2. Análisis de las características físicas del tepetate.....	54
9.2.1. Clases de tamaño de partícula (terrones).....	54
9.2.2. Estabilidad de partículas (terrones) en húmedo.....	55

9.2.3. Color.....	56
9.2.4. Clase textural.....	57
9.2.5. Densidad real.....	57
9.2.6. Densidad aparente.....	57
9.2.7. Desleimiento.....	58
9.3. Cuantificación de la biomasa vegetal.....	59
9.4. Análisis selectos de laboratorio.....	63
9.4.1. Óxidos de elementos mayores.....	63
9.4.2. Índices de intemperismo.....	64
9.4.3. Análisis mineralógico de la muestra total y de la fracción de arcilla fina menor a 2 µm.....	67
9.4.4. Análisis micromorfológico y morfométrico de agregados.....	70
9.5. Índices de calidad del tepetate.....	75
9.5.1 Selección.....	75
9.5.2. Valorización de los índices de calidad.....	76
9.5.3. Observaciones relativas a los índices de calidad utilizados.....	78
9.5.4. Biomasa <i>versus</i> índice de calidad.....	80
10. CONCLUSIONES.....	82
11. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
12. LITERATURA CITADA.....	85
13. ANEXOS.....	96
Anexo I. Características del Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>).....	96
Anexo II. Cantidades de nutrimentos que aporta el estiércol bovino por cuatro años.....	99
Anexo III. Evaluación de los índices de calidad para el diagnóstico del tepetate.....	100

Índice de tablas

Tabla 1.	Composición química de clases de estiércoles.....	23
Tabla 2.	Características físicas y químicas determinadas sobre el tepetate en estado inicial y sin alterar.....	30
Tabla 3.	Tratamientos establecidos durante el experimento.....	32
Tabla 4.	Métodos y técnicas empleados para los análisis generales.....	33
Tabla 5.	Métodos empleados para los análisis selectos de laboratorio.....	34
Tabla 6.	Tratamientos seleccionados para análisis de mineralogía por difracción de Rayos X.....	36
Tabla 7.	Valores de pH en agua de los tratamientos establecidos	38
Tabla 8.	Contenido porcentual de materia orgánica.....	40
Tabla 9.	Capacidad de intercambio catiónico.....	42
Tabla 10.	Porcentaje de saturación de bases.....	43
Tabla 11.	Concentración de calcio intercambiable.....	44
Tabla 12.	Concentración de magnesio intercambiable.....	45
Tabla 13.	Concentración de potasio intercambiable.....	46
Tabla 14.	Concentración de sodio intercambiable.....	47
Tabla 15.	Porcentaje de sodio intercambiable (PSI).....	48
Tabla 16.	Contenido porcentual de cationes intercambiables en el tepetate.....	50
Tabla 17.	Rango adecuado de cationes intercambiables.....	51
Tabla 18.	Relación calcio:magnesio en los tratamientos.....	51
Tabla 19.	Valores de conductividad eléctrica.....	52
Tabla 20.	Porcentaje promedio del diámetro de partículas.....	54
Tabla 21.	Porcentaje promedio de la estabilidad en húmedo de clases de tamaño de partículas.....	55
Tabla 22.	Características físicas del tepetate.....	58
Tabla 23.	Promedio del peso seco de la planta.....	59
Tabla 24.	Relación entre cationes en el tepetate.....	61

Tabla 25.	Relaciones adecuadas entre cationes.....	62
Tabla 26.	Concentración de óxidos de elementos mayores.....	63
Tabla 27.	Índices de intemperismo.....	64
Tabla 28.	Resultado de los análisis de difracción de Rayos X en muestra total.....	67
Tabla 29.	Resultado de los análisis de difracción de Rayos X en la fracción arcilla (<2 μm).....	68
Tabla 30.	Rasgos morfológicos encontrados en el tepetate.....	70
Tabla 31.	Valor en porcentaje del área de cada rasgo morfológico.....	74
Tabla 32.	Características físicas y químicas del tepetate.....	75
Tabla 33.	Evaluación de índices de calidad en el tepetate.....	76
Tabla 34.	Biomasa aérea total <i>versus</i> valor de índice de calidad.....	80
Tabla 35.	Cantidades de nutrimentos que aporta el estiércol bovino por un periodo de cuatro años.....	99
Tabla 36.	Valores asignados a los índices de calidad.....	100

Índice de figuras

Figura 1.	Vista aérea de la zona donde se recolectó el material.....	31
Figura 2.	Agregados presentes en el tratamiento PFA en la fracción mayor a 10 mm, para la elaboración de la lámina delgada.....	36
Figura 3.	Contenido porcentual de materia orgánica.....	41
Figura 4.	Bases intercambiables (Ca^{2+} y Mg^{2+}).....	46
Figura 5.	Bases intercambiables (K^{+} y Na^{+}).....	49
Figura 6.	Promedio de la conductividad eléctrica.....	53
Figura 7.	Agregados presentes en la fracción mayor a 10 mm de tratamientos con planta y estiércol.....	58
Figura 8.	Promedio de la biomasa obtenida en dos cortes.....	60

Figura 9.	Difractograma del análisis de la muestra total.....	68
Figura 10.	Difractograma de la fracción arcilla de la muestra TAB.....	69
Figura 11.	Difractograma de la fracción arcilla de la muestra PFA.....	69
Figura 12.	Micromorfología de la muestra PFA.....	71
Figura 13.	Sección 1 (lámina delgada).....	73
Figura 14.	Sección 2 (lámina delgada).....	73
Figura 15.	Sección 3 (lámina delgada).....	74
Figura 16.	Sección 4 (lámina delgada).....	74

1. RESUMEN

Los tepetates son capas volcánicas endurecidas, que afloran a causa de la degradación del suelo, provocada por la actividad del hombre. Estas capas presentan una amplia distribución en el territorio mexicano y por sus características físicas y químicas, impiden el desarrollo de especies vegetales; por lo tanto resultan áreas improductivas para la agricultura. Lo anterior representa una problemática para el país ya que se pierde continuamente superficie de uso agrícola y forestal, provocando problemas sociales, ecológicos y económicos.

Es por eso que este trabajo está interesado en aportar información a la importante tarea de la habilitación de tepetates para su incorporación al uso agrícola. El objetivo del trabajo consistió en evaluar los cambios que presentaron algunas características físicas y químicas del tepetate, por efecto del cultivo de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), adición de estiércol bovino y fertilizante químico. De igual manera se evaluó la biomasa del cultivo al final del experimento.

El tepetate utilizado para este trabajo es proveniente del municipio de Tetela del Volcán, localizado al noroeste del estado de Morelos y se ubica geográficamente, entre los 18°57'48" norte y 99°15'12" oeste, a 2040 msnm.

El diseño experimental consistió en 12 tratamientos con 4 repeticiones cada uno, equivalente a 48 unidades experimentales. Los factores considerados para el experimento fueron: (1) Planta (con planta y sin planta), (2) Estiércol bovino (dosis baja, dosis media, dosis alta y sin estiércol), (3) Fertilizante químico (con fertilizante y sin fertilizante).

El experimento tuvo una duración de 9 meses y se realizó en el invernadero del Instituto de Geología de la UNAM. Los resultados se analizaron estadísticamente mediante un análisis de varianza, utilizando la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) en las medias.

El efecto del desarrollo del sorgo y de los tratamientos sobre las características físicas del tepetate, evidencian lo siguiente: las clases de tamaño de partículas, estabilidad de partículas en húmedo, color y clase textural, resultaron sin diferencias entre tratamientos. En contraste, la densidad real y aparente, resultan muy variables, tanto en el testigo absoluto como en las muestras expuestas a los tratamientos.

En cuanto a las características químicas del tepetate; se observó que los valores de pH se mantuvieron cercanos a la neutralidad en todos los tratamientos. Asimismo, el porcentaje de materia orgánica presentó niveles considerablemente bajos, particularmente en TAB, mostrando un incremento, en tratamientos con estiércol y cultivo.

La capacidad de intercambio catiónico, así como el porcentaje de bases intercambiables, presentan valores altos en todos los tratamientos.

Respecto a la concentración de bases intercambiables, los porcentajes de Ca son pobres, a diferencia de los demás cationes (Mg, Na y K) que incrementan su concentración

proporcionalmente al porcentaje de la dosis de estiércol adicionada por los tratamientos. Además, la relación Ca: Mg indica en varios casos, una deficiencia severa de Ca.

En cuanto a la conductividad eléctrica, ésta presenta, en general, valores adecuados por debajo de 4.0 dSm^{-1} .

Por otra parte, de acuerdo con los resultados obtenidos para la producción de biomasa, se observó que el mejor tratamiento fue PFB (planta con dosis baja de estiércol y fertilizante) ya que obtuvo los mejores porcentajes en la producción de peso seco de la planta.

El estudio mineralógico, muestra que este tepetate está constituido por anortita, ópalo, augita, magnetita y vidrio volcánico. Su fracción menor a $2 \mu\text{m}$ evidencia la existencia de haloisita. Los análisis de micromorfología y morfometría realizados, demuestran la presencia de restos escasos de materia orgánica los cuales, llegan a formar complejos organominerales.

2. INTRODUCCIÓN

Actualmente existe en México una severa y creciente problemática ambiental respecto a la degradación del suelo, derivada de la intensa actividad antropogénica, de modo particular, del cambio de uso de suelo (García *et al.*, 2007). Esto ha reducido significativamente la extensión territorial apta para actividades agrícolas y pecuarias, en todo el país (Gama *et al.*, 2007).

Dentro de dicha problemática, se encuentra la presencia de tepetates; horizontes de origen volcánico endurecidos por compactación, y en ocasiones cementados, que afloran a la superficie terrestre como consecuencia de la pérdida de la capa superficial del suelo por procesos de erosión. En los tepetates, dichos procesos pueden originarse por causas naturales, o bien, son resultado de la explotación y mal manejo de los suelos (Etchevers *et al.*, 1998).

La importancia de este material endurecido se debe a que ocupan en México una superficie de importancia económica. Flores *et al.* (1991), estimaron que aproximadamente abarcan un 30% de la superficie total del territorio mexicano. Tan solo en el Eje Neovolcánico Mexicano ocupan 30,700 km² (Flores *et al.*, 1991). Esta es una zona con una gran presión demográfica, caracterizada en su mayoría por la congregación de campesinos de bajos recursos (Velázquez *et al.*, 2001; García *et al.*, 2008) que presentan una alta tasa de migración resultado de la degradación de tierras de labor, entre otras problemáticas socioeconómicas (Etchevers *et al.*, 1998).

Otro aspecto importante de la presencia de tepetates, es su estrecha relación con problemas de erosión, exceso de sales y aridez. La exposición de este material representa una gran problemática para la agricultura, debido a sus características que limitan la infiltración del agua, el paso del aire y por ende el desarrollo de especies vegetales (García *et al.*, 2007; Gama *et al.*, 2007).

Es por eso que se han desarrollado diversos trabajos implementando diferentes prácticas como la roturación, aplicación de enmiendas orgánicas y químicas, así como el establecimiento de especies vegetales. Esto con la finalidad de modificar sus características químicas y físicas y de esta manera, contribuir a su habilitación para su incorporación a la producción agrícola (Velázquez, 2002; García *et al.*, 2008).

Ante esta problemática, la presente tesis aporta información básica y aplicada para mejorar la calidad y productividad del cultivo de sorgo que se desarrolla en suelos volcánicos compactados y/o cementados. Cabe mencionar que dicho proyecto forma parte de una línea de investigación que busca la habilitación de los tepetates. Desarrollada desde 2005 por el Dr. David Flores Román, del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de México.

En esta tesis, así como en estudios anteriores, se incluye el cultivo de una especie vegetal y la aplicación de enmiendas orgánicas e inorgánicas, con la finalidad de modificar favorablemente las características físicas y químicas del tepetate, de modo particular las

que impiden o limitan el desarrollo vegetal. Así, con base en ello, se pretende dar cumplimiento a los siguientes objetivos: Evaluar los cambios de algunas características físicas y químicas de un tepetate por efecto del cultivo de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) *Moench*), así como, por la adición de estiércol bovino y fertilizante químico; como una estrategia para mejorar su calidad productiva.

Así mismo, se emplearon diversos indicadores de calidad, físicos y químicos, para analizar y cuantificar los cambios ocurridos en el tepetate bajo condiciones experimentales.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Tepetates

3.1.1. Definición y marco histórico.

En México la palabra tepetate se deriva del Náhuatl *tepétlatl*, vocablo compuesto por las raíces *tetl* que significa piedra y *pétlatl*, petate. Que se traduce como “petate de piedra”, “parecido a piedra” o “roca suave” (Flores *et al.*, 1991). Como ha sido mencionado, el término tepetate comprende a las capas u horizontes endurecidos que presentan diferentes grados de compactación o cementación. Ambos procesos se originan a partir de procesos geológicos y edafogénicos que actúan sobre materiales de origen volcánico (Flores *et al.*, 1991; Gama *et al.*, 2007). En la actualidad solo son denominados tepetates, a las capas endurecidas o cementadas de origen volcánico, es decir; fragipanes y duripanes, excluyendo aquellas que se originaron por procesos sedimentarios (Covaleda *et al.*, 2009).

Es adecuado citar que se tiene conocimiento del uso y limitantes de los tepetates desde hace varios siglos. Así, las culturas prehispánicas clasificaban y caracterizaban estas capas endurecidas (Flores *et al.*, 1992). Desde entonces se han realizado diferentes actividades de laboreo y fertilización para la incorporación de dichas capas a la agricultura (Gama *et al.*, 2007).

Un ejemplo étnico de estas prácticas son los tlaxcaltecas, los cuales ya tenían conocimiento de la problemática que representa el afloramiento de este material. Como una medida correctiva, realizaban la quema de pencas de maguey, para después incorporarlo al tepetate previamente fragmentado, con el fin de adicionar nutrientes, otra forma consistía en añadir estiércol de animales o el cultivo de especies resistentes (Gama *et al.*, 2007).

A partir de 1960, es cuando comienza el estudio sistematizado de los tepetates en México, enfocado principalmente en la caracterización y cartografía (Gama *et al.*, 2007). Posteriormente, a finales de la misma década, se desarrollan diversas investigaciones con el propósito de descifrar el origen y distribución de los tepetates, así como su caracterización física y química, morfología y su incorporación al proceso productivo (Custode *et al.*, 1992; Quantin, 1998; Avilés, 2013; Atilano, 2014).

3.1.2. Características diagnósticas

Es común que los tepetates presenten ciertas características, físicas y químicas que los conceptualizan. Por ejemplo:

Características físicas

- Muestran una alta densidad aparente (1.7-1.9 g/cm³), producto de la consolidación y compactación. Sin embargo, estos valores resultan muy heterogéneos y

variables en tepetates donde se presentan intergradaciones entre duripan- (material cementado) y fragipan (material consolidado y compactado) (Gama *et al.*, 2007).

- La porosidad es baja (13 a 14%), lo que les confiere permeabilidad y aireación casi nula y una lenta infiltración por lo que limita severamente el desarrollo y penetración de las raíces de las plantas (Flores *et al.*, 2001; Gama *et al.*, 2007). Como en el caso anterior, estos valores resultan muy variables en tepetates donde existen intergradaciones entre duripán - fragipán.
- Los valores de conductividad hidráulica y de retención de humedad son bajos (*ídem*).
- Respecto a la textura, poseen una matriz heterogénea compuesta por gravillas, arena, limo y un contenido variable de arcilla (Gama *et al.*, 2007).
- Su estructura generalmente es masiva o laminar (terrones), aunque rompe por efecto mecánico en una pseudoestructura de bloques angulares y/o subangulares.
- Su resistencia a la ruptura es generalmente muy alta en seco (dura a extremadamente dura) siendo esta variable en húmedo, ya que oscila de friable (fragipanes) a firme (duripanes), cuando presenta cementación significativa, la resistencia es extremadamente firme (Flores *et al.*, 1991; Gama *et al.*, 2007).

Características químicas

- Frecuentemente los tepetates muestran una capacidad de intercambio catiónico de media a alta, con valores que van de 19 hasta 40 $\text{Cmol}^+\text{Kg}^{-1}$, suficiente para una adecuada capacidad de retención nutrimental (Etchevers *et al.*, 1992; Gama *et al.*, 2007).
- El pH presenta valores que van desde neutro a ligeramente alcalino, ambos adecuados para el desarrollo vegetal (Etchevers *et al.*, 1992).
- Presentan una escasa o nula cantidad de materia orgánica, nitrógeno (N) y fósforo (P) (Flores *et al.*, 2001). Por lo que resulta un impedimento para el desarrollo de la vegetación, propiciando una limitada actividad biológica (Gama *et al.*, 2007).
- Aun cuando la disponibilidad de fósforo generalmente es baja, su capacidad de adsorción es elevada lo que le permite aumentar su concentración en el medio con relativa facilidad (Etchevers *et al.*, 1992).
- Los elementos esenciales, especialmente Ca, Mg, K y microelementos, en los tepetates, frecuentemente se encuentran en niveles suficientes para el crecimiento de las plantas (Etchevers, 1997).

3.1.3. Tipos morfogenéticos

Las capas volcánicas endurecidas se pueden clasificar en función del grado de compactación y cementación que presentan. Como ha sido anteriormente citado, cuando en estas capas hay una compactación fuerte pero una escasa cementación se les denomina fragipanes (Flores *et al.*, 1991). Estos fragipanes se caracterizan por: (i) alta densidad aparente, (ii) colapsar su estructura al contacto prolongado con el agua, (iii) presentar frecuentemente una textura franca y (iv) tener contenido de materia orgánica bajo. Se localizan en regiones con clima subhúmedo, generalmente en piedemonte (Hidalgo *et al.*, 1997; Acevedo *et al.*, 2003).

Cuando las capas están cementadas principalmente por sílice (SiO_2) y en ocasiones, también por carbonatos y arcillas, se les denominan duripanes. Estos duripanes a diferencia de los fragipanes, mantienen la estabilidad de su “estructura” al contacto prolongado con el agua. Como ha sido mencionado anteriormente, el tepetate posee una baja porosidad y puede tener poros de diámetro reducido o parcialmente cerrado, que impiden la penetración de las raíces. Generalmente presentan colores claros, blancos o grises y en menor proporción se llegan a presentar colores rojizos y amarillentos (Guerrero *et al.*, 1992; Flores *et al.*, 1991, 1996; Gama *et al.*, 2007).

Existen otros horizontes endurecidos, que no se consideran tepetates por su origen, estos son las petroplinitas, petrocálcicos y petrogípsicos. Por ejemplo, cuando los cementantes son sesquióxidos de aluminio y hierro (Fe_2O_3 y Al_2O_3), originan las petroplinitas. Éstas se forman por la segregación de hierro dentro del perfil del suelo, bajo condiciones de óxido-reducción, consecuencia de la presencia de una lámina de agua fluctuante. Se caracterizan por una coloración que oscila de amarillo muy claro a rojo intenso (Flores *et al.*, 1991).

Otras capas endurecidas presentan una cementación por carbonato de calcio CaCO_3 formando los petrocálcicos o bien, los denominados petrogípsicos, capas cementadas por sulfato de calcio CaSO_4 y en algunas ocasiones por CaCO_3 . Ambas son extremadamente duras y predomina en ellas un color blanquecino. Dichas capas se encuentran en zonas de clima árido, con una gran evapotranspiración, principalmente en estados del norcentro del país (Flores *et al.*, 1991; Guerrero *et al.*, 1992).

3.1.4. Génesis de los tepetates

El conocimiento actual acerca de los procesos de génesis de las capas volcánicas endurecidas aún es insuficiente, por lo que sigue siendo motivo de discusiones entre los investigadores (Avilés, 2013). Así, Flores *et al.* (1992) plantean la hipótesis de que el origen de los tepetates tipo fragipán, en el estado de Morelos, se debe a partir de materiales de origen ígneo, esencialmente cenizas, que sufrieron una compactación debido a la consolidación mecánica de partículas (hidroconsolidación), la cual se debió probablemente al peso y la expansión por congelamiento causados por fenómenos de periglaciaciones.

En el caso de los tepetates tipo duripán presentes en el estado de Morelos se propone que su formación es a partir de tobas andesíticas cubiertas por suelo enriquecido con piroclastos, resultado de erupciones volcánicas. Los compuestos de sílice, derivado del intemperismo de los piroclastos, son transportados por lixiviación desde el perfil superior hasta el horizonte inferior durante los periodos de lluvia de la misma manera que las arcillas finas, hasta alcanzar el depósito de toba. Al finalizar las lluvias, el sílice se precipita entre las partículas piroclásticas y actúa como cementante (Flores *et al.*, 1996).

En general se proponen tres principales procesos que explican el posible origen de los tepetates, el geológico, pedológico o la combinación de ambos (Flores *et al.*, 1996).

3.1.4.1. Origen geológico

Zebrowski (1992), reconoce la existencia de dos procesos geológicos que describe: (1) como el endurecimiento de los materiales en el momento de su depósito, como es el caso de los flujos piroclásticos que se endurecen al enfriarse y (2) debido a una compactación (consolidación-compactación simple) o por transportación de los materiales en el agua (hidroconsolidación), que en ambos casos se relacionan con el aumento de densidad aparente y una disminución en la porosidad total (Gama *et al.*, 2007).

3.1.4.2. Origen pedológico

El endurecimiento de estos horizontes también tiene un origen por procesos pedológicos, éstos consisten en la cementación y endurecimiento de las cenizas volcánicas por una argilización o silificación gradual por efecto de agentes cementantes.

El contenido de óxidos de silicio, aluminio y fierro, y en menor proporción arcillas como caolinita y montmorillonita, se liberan como productos secundarios a partir del intemperismo de cenizas volcánicas, que al lixiviarse se depositan en horizontes inferiores en formación y actúan como agentes cementantes. Esto ocurre generalmente en zonas templadas y semiáridas con periodos de lluvia alternantes (Zebrowski, 1992; Flores *et al.*, 1992; Gama *et al.*, 2007; Avilés, 2013).

3.1.5. Distribución a nivel nacional

En México, el 30% de la superficie se encuentra cubierta por capas endurecidas con diferentes grados de cementación o compactación (Flores *et al.*, 1992), ya sea aflorando sobre la superficie o dentro de los primeros 100 cm de profundidad del suelo. La distribución de los tepetates corresponde principalmente a la altiplanicie Mexicana así como al Eje Neovolcánico Transversal Mexicano (Flores *et al.*, 1991).

Los tepetates se presentan, principalmente, en los estados de Jalisco, Nayarit, Colima, Michoacán, Estado de México, Distrito Federal, Querétaro, Puebla, Veracruz y Morelos (Prat *et al.*, 2003). Se estima que la distribución de estos materiales está en función de

diferentes factores, como el material parental, clima, topografía, y altitud (Gama *et al.*, 2007).

Generalmente se presentan en altitudes entre los 1800 y 2800 msnm. y en piedemontes de origen volcánico, formados en el Cuaternario. Aunque los tepetates se llegan a presentar en diferentes climas, principalmente se encuentran en climas subhúmedos con una estación seca que dura de 4 a 6 meses y una tasa de evapotranspiración generalmente mayor a la precipitación (Gama *et al.*, 2007).

En climas templados, semiáridos y húmedos se encuentran tepetates tipo duripán, donde la precipitación es suficiente para disolver los productos del intemperismo pero donde no ocurre lixiviación. Los fragipanes ocurren en climas cálidos y fríos donde la precipitación es mayor a la evapotranspiración (Flores *et al.*, 1991).

3.1.6. Importancia

La amplia distribución de estos materiales volcánicos endurecidos, los hace tener una gran importancia, tanto económica como social (Báez *et al.*, 2007). Como es el caso de los estados de Tlaxcala y de México donde existe una gran densidad poblacional y una tasa considerable de migración. La falta de tierras de labor, un mal manejo, el empobrecimiento del suelo y los procesos de erosión es una de tantas causas de migración de personas de escasos recursos hacia zonas urbanas como la ciudad de México, Puebla y Cuernavaca (Etchevers *et al.*, 1998).

Se estima que una forma de disminuir la presión social por las tierras de cultivo que ejerce la población de dichos estados es la incorporación de estas áreas “tepetatosas” a la producción agrícola, ganadera o forestal. Esto ayudaría a conservar una fracción de los habitantes en su zona de origen y de esta manera se estaría contribuyendo a la solución de esta problemática económica (Etchevers *et al.*, 1998).

3.2. Degradación del suelo

3.2.1. La degradación del suelo como factor formador de tepetates

De acuerdo con la FAO-PNUMA (1980) citado por Gama *et al.* (2007), se considera que la exposición de tepetates se debe a factores de degradación física del suelo, los cuales se dividen en:

1. Naturales. Constituidos por el factor climático (escasez y torrencialidad de lluvias) y edáfico (compactación, consolidación y cementación no antropogénica).
2. Antrópicos. Estos factores engloban todas las actividades antropogénicas, como cambio en el uso de suelo, la deforestación, sobreexplotación de la vegetación,

sobrepastoreo y actividades industriales y urbanizadoras, incluyendo el uso de maquinaria agrícola pesada.

Los factores de degradación antes mencionados tienen como consecuencia diferentes procesos: (a) deterioro de la estructura del suelo y su susceptibilidad a la erosión, (b) pérdida del horizonte A debido a la erosión, (c) afloramiento del horizonte subyacente al horizonte A y su exposición a variaciones en su humedad, ocasionando una compactación y consolidación por hidroconsolidación, (d) disminución de la porosidad y (e) incremento en la densidad y resistencia a la ruptura (dureza). Bajo estas condiciones el horizonte compactado puede ser cementado por la precipitación de diferentes lixiviados como la sílice libre (SiO_2) (Gama *et al.*, 2007).

3.2.2. La tepetatización y su dinámica

La presencia de tepetates deriva del proceso denominado “tepetatización” el cual genera diferentes tipos de degradación secundaria, que contribuyen a la exposición de nuevas capas endurecidas (Gama *et al.*, 2007).

Con frecuencia, los altos porcentajes de arenas finas y limos en los tepetates, así como la baja aireación e infiltración del agua, los hace muy susceptibles a la erosión (erodabilidad alta). La baja permeabilidad que presentan, aunado con las pendientes que ocupan, la escasa vegetación y la precipitación alta provocan un intenso drenaje lateral, escorrentía y lavado cuando el suelo sobreyace al tepetate (Gama *et al.*, 2007; Pajares *et al.*, 2010).

El drenaje lateral sucede debido a la diferencia de permeabilidad que existe entre el suelo y el tepetate, cuando el agua se filtra por el suelo hasta hacer contacto con la superficie del tepetate, ésta se desliza a favor de la pendiente, afectando la fertilidad del suelo, debido al lavado y pérdida de sales solubles (desbasificación) y materia orgánica. Si la pendiente es plana, el agua llega a estancarse generando condiciones de anaerobiosis en el subsuelo, afectando el crecimiento radicular de los cultivos (Gama *et al.*, 2007).

La escorrentía, por otro lado, genera diferentes tipos de erosión (erosión por salpicadura, erosión laminar y erosión en cárcavas), desprendiendo y transportando grandes volúmenes de suelo, que generalmente se depositan en la base de la pendiente, generando contaminación de cuerpos de agua (Gama *et al.*, 2007).

3.3. La habilitación como respuesta a la degradación

3.3.1. Habilitación

Una vez que se presentan estas capas, de modo principal las que muestran cementación, la superficie edáfica pierde parcial o totalmente, la capacidad de ser utilizada con fines agrícolas. Esto, es debido a las características morfogenéticas del tepetate como son: dureza significativa, densidad aparente alta, muy bajo contenido de materia orgánica,

deficiencia en nitrógeno y fósforo, baja capacidad de almacenamiento de agua, estructura masiva y deficiente actividad biológica. Todos estos parámetros impiden el desarrollo vegetativo y hacen que el establecimiento de especies cultivadas sea muy difícil y con frecuencia imposible.

Es por eso, que la habilitación tiene como objetivo cambiar de modo gradual y sistemático, el material (tepetate) pobre en fertilidad natural, en un sustrato antropogénico productivo. Para ello, es necesario modificar sus características físicas, químicas y biológicas para una producción agrícola sustentable (Haulon *et al.*, 2007).

La habilitación y en algunos casos la reincorporación de los tepetates al uso agrícola, se ha desarrollado en las últimas décadas para hacer frente a la alta demanda de tierras arables para la producción de alimentos, consecuencia del crecimiento de la población (Haulon *et al.*, 2007).

3.3.2. Antecedentes

En México, se han realizado diversos estudios que contribuyen a la habilitación de tepetates. Estos han sido particularmente frecuentes en los estados de Tlaxcala, Estado de México y Morelos. Con ello se ha buscado incorporarlos a la producción agrícola para satisfacer la demanda por tierras de cultivo y a la actividad forestal. (Arias *et al.*, 1992; Haulon *et al.*, 2007; Avilés, 2013).

Dentro de la línea de investigación a la cual pertenece esta tesis, se han implementado diversos estudios sobre tepetates, en los cuales se han empleado enmiendas orgánicas (estiércol, vermicomposta, composta y micorrizas), enmiendas inorgánicas (fertilizantes químicos) y el cultivo de diversas especies vegetales: pasto Rhodes (*Chloris gayana* Kunth), guayaba (*Psidium guajava* L.), casuarina (*Casuarina equisetifolia* L.), eucalipto (*Eucalyptus globulus* L.), higuera (*Ficus caricia* L.), clavel (*Dianthus caryophyllus* L.), durazno (*Prunus persica* L.), cempasúchil (*Tagetes erecta* L.).

Como ha sido mencionado, dichos estudios tienen la finalidad de alterar y modificar favorablemente las características físicas y químicas del tepetate; con esto se busca contribuir a su habilitación e integración a la producción (Díaz, 2001; Acevedo *et al.*, 2001; Velázquez *et al.*, 2001; Prat *et al.*, 2003; Izquierdo, 2004; García *et al.*, 2007; Baéz *et al.*, 2007; García *et al.*, 2008; Flores *et al.*, 2011). Así, esta línea de investigación ha tenido como meta la habilitación de los tepetates, a través de inducir y propiciar su intemperismo físico y químico en experimentos controlados de laboratorio.

Hasta ahora se han obtenido resultados satisfactorios en las prácticas experimentales realizadas en dichos estudios. Así, se ha concluido por diversos autores (Díaz, 2001; Plancarte, 2006; García *et al.*, 2008; Flores *et al.*, 2011; Atilano, 2014), que el efecto de especies vegetales utilizadas, como de abonos orgánicos, es fundamental para la

fragmentación natural del tepetate, favorecer la estructuración e incrementar el contenido de materia orgánica en el tepetate.

3.3.3. Metodologías para la habilitación de los tepetates

Parte de la habilitación del tepetate consiste en su previa fragmentación. Se considera que el tamaño final de los fragmentos debe ser entre 0.5 a 8 mm, ya que de esta forma genera las propiedades ideales para la retención de agua y aireación (Zebrowski, 1992). Por otro lado Etchevers *et al.* (1998) calculan que el tamaño óptimo de los fragmentos que deben quedar al finalizar los tratamientos de recuperación, es de aproximadamente 3 a 5 mm. Además, este autor registra una densidad aparente para tepetates roturados (cementados) aproximadamente de 1.2 g/cm^3 , mientras que en su estado natural es cercana a 1.6 g/cm^3 , aunque en varias investigaciones, existen reportes de que puede ser $> 2 \text{ g/cm}^3$ (Acevedo *et al.*, 2003).

Aun cuando la roturación mejora las condiciones para el desarrollo de plantas, no garantiza la habilitación de los tepetates. Así, es necesario complementar con la aplicación de enmiendas como fertilizantes inorgánicos, compostas y estiércol. De igual manera implica la elaboración de terrazas incluyendo el cultivo de plantas que contribuyan a mejorarlas con el fin de disminuir la erosión hídrica (Zebrowski, 1992).

Por lo mencionado anteriormente, es necesario inducir la formación de agregados estables, así como incrementar la cantidad de materia orgánica y nutrimentos. Esto se logra a través del tiempo, principalmente mediante la adición de materia orgánica como estiércol, composta y residuos de cosecha (Báez *et al.*, 2007; Dimas *et al.*, 2001).

Etchevers *et al.* (1998) menciona que los productos metabólicos originados por la descomposición de los abonos orgánicos contribuyen a la agregación y estructuración del suelo, que a su vez favorece a la acumulación de reservas hídricas y provee a las plantas un sustrato fácil de explorar así como un adecuado abastecimiento de nutrimentos.

Sin embargo, al roturar los suelos volcánicos endurecidos, se hacen muy susceptibles a la erosión (Etchevers, 1998), por ello deben ser cultivados, de lo contrario la pérdida de suelo incrementa considerablemente y la escorrentía crece como resultado de menor infiltración; sin embargo, cuando se encuentra cultivado, la tasa de erosión y escorrentía disminuye (Haulon *et al.*, 2007).

Si la parcela ya fragmentada (roturada) es abandonada o si hay manejo inadecuado de la técnica, estos beneficios tienden a perderse debido al sellado y compactación del material. Además de que las altas tasas de erosión inducidas por la fragmentación provocan la remoción de las capas sueltas hasta que el horizonte endurecido emerge de nuevo (Haulon *et al.*, 2007).

Por lo tanto, las actividades de labranza, así como la adición de materia orgánica deben ser constantes para evitar su endurecimiento y/o cementación, es por eso que estas

actividades llegan a ser muy costosas y consecuentemente su uso es limitado (Gama *et al.*, 2007).

Como menciona Gama *et al.* (2007) el proceso puede llegar a ser largo y costoso, pero mediante un manejo constante en la aplicación de abonos y fertilizantes, así como el uso de rotaciones de cultivos y un buen suministro de agua se llega a alcanzar un nivel productivo adecuado para este material.

Se sabe que la habilitación de tepetates tipo fragipán suele ser relativamente más fácil a diferencia de los duripanes que llegan a ser menos susceptibles a los cambios (Etchevers *et al.*, 1998).

3.3.4. Influencia de la vegetación/cultivos

Las plantas naturales y cultivadas juegan un papel primordial en la habilitación de los tepetates, contribuyendo directa e indirectamente en el proceso de intemperismo biológico, el cual puede ser de carácter físico y químico (Carrento, 2000). Las raíces de las plantas, al crecer y desarrollarse entre las fisuras presentes en el tepetate, ejercen una gran presión, de esta forma se favorece la ruptura del material, incrementando el tamaño de grietas. Al aumentar el espacio y el material suelto, permite a los organismos vivos como bacterias y hongos desarrollarse y contribuir con el proceso (Carrento, 2000).

Por otra parte, las plantas al adsorber nutrientes (K, Ca, Mg) liberan iones H^+ en los minerales, al incrementar su concentración generan un medio ácido que ataca químicamente a los materiales que constituyen a los tepetates. Los procesos generados por la vegetación y/o cultivos aceleran la meteorización química e inicia la formación de un protosuelo y posteriormente de un suelo (Fassbender, 1975). Además las raíces de las plantas liberan anhídrido carbónico, favoreciendo la carbonatación. Si bien la carbonatación por sí sola no contribuye al intemperismo del suelo o en este caso del tepetate, es un paso previo a la aportación de hidrogeniones responsables de la hidrólisis (Carenas, 2014).

Una vez que las plantas o el cultivo mueren, la degradación de los restos produce materia húmica. Las raíces muertas se descomponen, consumiendo el oxígeno de los poros del suelo provocando la reducción de los minerales circundantes (Manahan, 2007; Iriondo, 2007).

Las raíces favorecen las poblaciones de microorganismos, crean asociaciones con hongos, aportan grandes concentraciones de materia orgánica a la rizósfera y sirve como fuente de alimento para los organismos (Russell, 1988).

Existe una estrecha relación entre la estructura morfogénica y el desarrollo vegetal, en especial la del sistema radical. Los principales procesos en los que las raíces influyen en la agregación se agrupan en: (i) penetración de raíces, (ii) producción de exudados, (iii) entrelazamiento de agregados causados por las raíces, (iv) descomposición de las raíces

muertas y (v) modificación del régimen hídrico. Es importante mencionar que el efecto del sistema radical puede variar según las diferentes especies vegetales; se ha observado que el impacto del crecimiento de las raíces sobre la estructura ha sido diferente en aéreas donde se han cultivado o donde se ha desarrollado vegetación natural (Torres *et al.*, 2013).

Se establece que el tipo de vegetación y/o cultivo, influye de cierta manera, no solo en la formación, tamaño y desarrollo de la estructura, sino también en otras características físicas y químicas, como densidad aparente, porosidad y pH. Los valores de pH llegan a ser afectados por dos mecanismos: la excreción de anhídrido carbónico y la adsorción diferencial de aniones y cationes (Torres *et al.*, 2013; Russell, 1988).

Las raíces, al desarrollarse, favorecen la porosidad, ejerciendo presiones de hasta 2 MPa, de esta forma se amplían los poros existentes y se crean nuevos, además generan un empaquetamiento de partículas y microagregados, aumentando la estabilidad de agregados dentro de la rizosfera (Torres *et al.*, 2013).

El uso de especies vegetales y de algunos cultivos, es fundamental para la recuperación de suelos tepetatosos, ya que favorece la estructura deficiente, gracias al efecto de las raíces sobre la fragmentación, reorganización y estabilización del material (Velázquez *et al.*, 2001).

En el caso de los tepetates, se ha comprobado que las raíces de las plantas favorecen la disgregación y agregación del material, formando posteriormente agregados estables, por el efecto físico de la raíz, así como por los exudados liberados a la rizosfera (García *et al.*, 2007).

3.4. Calidad del suelo y su evaluación

3.4.1. Definición

La calidad del suelo, sea éste de origen natural; o resultado de un manejo antrópico (vg. tepetates habilitados) es un concepto percibido de diferente manera por muchos autores (Karlen *et al.*, 1996; Knoepp, 2000; Andrews, 2003; Bautista *et al.*, 2004), aunque siempre está relacionado con la fertilidad, aptitud de uso, productividad potencial, sostenibilidad y calidad ambiental.

Se entiende por calidad del suelo a la capacidad que tiene un sustrato, natural o artificial, para cumplir con las funciones adecuadas en el ecosistema, para sostener la productividad biológica, mantener la calidad ambiental y promover la salud animal y vegetal (Warkentin, 1996). No obstante, para complementar esta definición es necesario analizar las diferentes características tanto físicas y químicas del suelo (Pajares *et al.*, 2010).

La calidad y la fertilidad son dos conceptos estrechamente asociados cuando se habla de producción agrícola. Se entiende por fertilidad a la cualidad del suelo para proporcionar los elementos apropiados, en cantidades y balance adecuado para un buen crecimiento de las plantas (NOM-021-SEMARNAT-2000; Buckman y Brady, 1985).

3.4.2. Evaluación

De acuerdo con Doran y Parquin, (1994, 1996) existen dos formas básicas para evaluar la calidad de un material, sea éste un suelo o como es el caso, un tepetate tratado para su habilitación al uso forestal o agrícola:

1. *Hacer mediciones periódicamente, a lo largo de un tiempo determinado, para monitorear cambios o tendencias en la calidad;*
2. *Comparar los valores medidos en el material a evaluar (vg. tepetate), con los de una condición de un suelo, estándar o de referencia, calificado por su alta fertilidad natural.*

Así, previamente, es necesario conocer cuáles son los parámetros y características de un suelo productivo y saludable para obtener un punto de comparación que pueda extrapolarse a otros materiales, (vg. tepetate, suelos antrópicos) (Valencia & Hernández, 1998).

Por ejemplo, para evaluar la calidad y fertilidad de un suelo o de un sustrato, inicialmente es necesario, determinar las siguientes características: estructura, agregación, textura, densidad real y aparente, porcentaje de espacio poroso, pH, capacidad de intercambio catiónico, porcentaje de materia orgánica y los macro y microelementos disponibles, según las necesidades del cultivo (Ditzler, 2002).

A partir de estos parámetros se tiene una idea de cuáles son las características físicas y químicas que influyen en la distribución de agua y aire en el suelo y conocer cuál es la disponibilidad de nutrientes para las plantas y microbiota (fertilidad natural).

3.4.3. Índices de calidad

De acuerdo con Doran y Parkin (1994) se establece que los indicadores o índices, son variables que ayudan a evaluar los cambios en la calidad del suelo y así conocer acerca de los cambios o tendencias de las condiciones en las que se encuentra el suelo. Estos índices son características físicas, químicas, biológicas o procesos que ocurren en el suelo (Bautista *et al.*, 2004) o en un sustrato (vg. Tepetate).

Con base en las características físicas y químicas del tepetate; los índices seleccionados en este trabajo para diagnosticar la calidad del tepetate son:

- (i) color; (ii) densidad aparente (g/cm^3) (iii) densidad real; (iv) textura; (v) clases de tamaño de partícula; (vi) desleimiento; (vii) potencial de hidrógeno (pH) en agua; (viii)

materia orgánica (MO); (ix) capacidad de intercambio catiónico (CIC); (x) saturación de bases intercambiables (concentración de calcio; concentración de magnesio Cmol^+kg^- ; concentración de potasio Cmol^+kg^- ; concentración de sodio Cmol^+kg^-) y (xi) conductividad eléctrica.

3.4.3.1. Indicadores físicos de la calidad del suelo

Estructura: agregación y estabilidad de agregados

Cuando se habla de estructura del suelo se debe entender por partículas, a toda la unidad que compone el suelo, ya sea partícula primaria que comprende la fracción de arena, limo o arcilla, o bien partículas secundarias que son los agregados (Aguilera, 1989). El concepto de estructura se refiere al arreglo u ordenación de las partículas, es decir, la agregación de partículas primarias (arena, limo y arcilla) y secundarias, en ciertos modelos o patrones (Baver, 1991). El grado de agregación, la estabilidad de los agregados y el espacio de los poros son caracteres que determinan la estructura de suelo (Baver, 1991).

La estructura del suelo, es un indicador de gran importancia, ya que es un factor principal que condiciona la fertilidad y la productividad de los suelos agrícolas (Dimas *et al.*, 2001). La estructura tiene una gran influencia en el movimiento de agua, la transferencia de calor, aireación, densidad de volumen y porosidad. Los macroporos permiten la circulación del agua evitando la erosión y disminuyendo la escorrentía (Buckman y Brady, 1985; Aguilera, 1989).

Cuando los suelos agrícolas son sometidos a un laboreo intenso, se compactan por el uso de maquinaria y la estructura se ve afectada negativamente (Dimas *et al.*, 2001). Una estructura desfavorable es un factor limitante para la fertilidad, la toma de nutrientes es limitada, ya sea por falta o exceso de agua y por deficiencia de oxígeno, las raíces no pueden desarrollarse y además de esto, la actividad microbiológica llega a ser pobre (Baver, 1991).

Para la formación de la estructura del suelo es necesaria la participación de diferentes factores, principalmente, la meteorización, que va transformando el material, la actividad de las raíces, que al penetrar el material y al morir, dejan espacios vacíos en forma de túbulos, así como, la actividad de animales y microorganismos (Thompson, 1988).

Agregación

La agregación es el proceso en el que se forma un agregado, creando un grupo de dos o más partículas primarias, que presentan una cohesión muy fuerte entre sí con más fuerza que al resto de partículas que las rodean (Kemper & Rosenau, 1986; Velázquez *et al.*, 2001). Los agregados o también conocidos como peds, son resultado de procesos pedogenéticos y están separados entre sí por espacios vacíos o poros (FAO 2009).

Estos agregados se clasifican en dos clases: Las partículas minerales primarias unidas por desechos de hongos, plantas y bacterias forman los microagregados. Estos a su vez, se unen por agentes aglutinantes temporales (hifas de hongos y raíces) y transitorios (polisacáridos derivados de exudados de plantas y microorganismos) formando macroagregados (Six *et al.*, 2000).

La importancia de los agregados radica en generar condiciones favorables para el desarrollo de las plantas así como la formación de una cama idónea para la germinación de semillas, debido a su relación con la porosidad, el movimiento y retención del agua, la circulación del aire y la resistencia del sustrato a la erosión y recompactación (Thompson, 1988; Acevedo *et al.*, 2001; Velázquez *et al.*, 2001).

Se sabe que la degradación de los agregados está relacionada con los niveles pobres de materia orgánica en el suelo. Es por eso que se considera de gran importancia la aplicación de enmiendas como estiércol y sistemas de cultivo, de esta forma se favorece la agregación y aireación del suelo, por el efecto que tienen las raíces, la protección que brinda la cubierta vegetal y la producción de materiales orgánicos que promueve la actividad biológica. Sin embargo se ha observado que los resultados no son permanentes, por lo que se recomienda no abandonar estas prácticas y tomar en cuenta rotaciones de cultivos para generar y mantener una buena estructura del suelo (Baver, 1991).

Estabilidad

La estabilidad de agregados se define como la resistencia de la fuerza cohesiva que mantienen unidas las partículas del suelo, ante una fuerza disruptiva aplicada (Kemper & Rosenau, 1986).

En otras palabras se entiende por estabilidad a la resistencia que tienen los agregados a la desintegración por acción del agua y por la manipulación mecánica. El agua puede afectar de forma negativa la agregación de dos maneras. La primera por el efecto de la hidratación, que desintegra el agregado por hidratación de su masa y la explosión del aire atrapado y la segunda es por la acción destructiva de las gotas de lluvia al impactar los agregados y dispersarlos (Baver, 1991).

Los factores que afectan la estabilidad de manera favorable en el suelo son aquellos que aumentan su permeabilidad, cohesión y disminuyen la entrada brusca del agua. Esto se le atribuye principalmente a la acción cementante de los polisacáridos, producto de la síntesis microbiana (Baver, 1991; Velázquez *et al.*, 1996).

Aun cuando no existen estudios específicos sobre la estabilidad en tepetates, se sabe que las especies vegetales favorecen la formación de agregados debido a los efectos físicos y químicos que generan las raíces en el suelo y al aporte de materia orgánica que hay durante su desarrollo (Velázquez *et al.*, 1996).

Se ha estudiado la correlación que tiene la materia orgánica y el incremento de la actividad microbiana con la estabilidad de agregados, se ha observado que la actividad de las raíces y microorganismos del suelo agregan las partículas por mecanismos complejos

de adsorción, envoltura y enrollamiento físico (Acevedo *et al.*, 2001). Por lo que se espera que el desarrollo de las raíces permita la unión temporal de partículas y fragmentos minerales, mecánicamente (adsorción envoltura o enrollamiento) y bioquímicamente por la cementación derivada de secreciones mucilaginosas (Acevedo *et al.*, 2002).

De igual manera, el estiércol adicionado como materia orgánica, favorecerá la formación de agregados y su estabilidad, mediante los compuestos producidos por su descomposición y resíntesis, que actuarán como enlaces entre la fracción mineral (Velázquez *et al.*, 2001).

Es necesario señalar que en las determinaciones de clases de tamaño de partícula y estabilidad de partículas en húmedo, realizadas en este trabajo, se emplea el término de partícula como sinónimo de terrón.

El terrón se define como una masa pequeña de tierra compacta, en ocasiones cementada, no agregada, generalmente deriva de las actividades antropogénicas, principalmente agrícolas. El terrón carece de estructura (USDA, 2002).

Densidad aparente

La densidad del suelo se define como la masa de una unidad de volumen de suelo seco; difiere de la densidad real en sentido que incluye el espacio poroso. Es un parámetro importante y muy útil para la descripción de la calidad del suelo, permite evaluar el balance hídrico y de nutrimentos (Siebe *et al.*, 1996). Los valores bajos indican una condición porosa del suelo, por lo que los valores altos indican un ambiente pobre para el crecimiento de raíces, aireación reducida y cambios indeseables en la función hidrológica como la reducción de infiltración de agua. Esto se relaciona con un manejo inadecuado que ha propiciado la compactación (FAO, 2009).

Se ha observado que gracias a las prácticas de roturación en la habilitación de tepetates, se ha logrado reducir los valores de densidad aparente, hasta un tercio del valor inicial. Por lo tanto después de esta actividad, se espera que los valores de densidad aparente descendan propiciando condiciones favorables para el establecimiento de especies vegetales (Prat *et al.*, 2003).

Color

El color es otro indicador importante ya que permite conocer las características biofísicas de la relación planta- suelo y es posible observar las condiciones de drenaje, aireación y porosidad del suelo (Aguilera, 1989; FAO, 2009).

El tono y la intensidad de los colores de los horizontes permiten hacer inferencias respecto a algunas características edáficas y procesos pedogenéticos. El color está determinado principalmente por los ácidos húmicos y flúvicos, compuestos de hierro y en menor medida de manganeso. Por lo tanto, refleja el contenido de materia orgánica, y proceso de oxidación o reducción en los suelos (Siebe *et al.*, 1996).

3.4.3.2. Indicadores químicos de la calidad del suelo

pH

El pH del suelo es uno de los parámetros químicos más importante, ya que su medición permite conocer más que solo el grado de acidez o basicidad. El pH depende del tipo y cantidad de cationes adsorbidos en la superficie de las arcillas y de la materia orgánica coloidal. cuando predominan cationes H^+ y Al^{3+} en la superficie de intercambio de los coloides del suelo provoca un incremento de iones H^+ en solución, generando un pH ácido y cuando aumenta, la aumentan cationes como Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ aumenta la concentración de iones OH^- en solución provocando un pH alcalino (Buckman y Brady, 1985).

El pH es muy importante ya que influye en la solubilidad y disponibilidad de nutrientes para las plantas, influye en la actividad de los microorganismos del suelo, en la mineralización de las sustancias orgánicas y determina la velocidad del intemperismo químico de los minerales (López, 1990).

El pH del suelo es un factor que influye en el crecimiento de las plantas, la asimilación de varios elementos esenciales se ve afectada fuertemente por el pH del suelo, así como la solubilidad de algunos elementos que son tóxicos para el crecimiento de las plantas, por ejemplo cuando el valor de pH se encuentra por debajo de 6.0 hay deficiencias de Ca, Mg y K mientras que Al, Fe y Mn pueden alcanzar niveles tóxicos. Cuando el pH es mayor a 7.0, elementos como Fe, Mn, Cu y Zn no pueden ser asimilables por las plantas y la actividad microbiana podría verse afectada (López, 1990).

Para la mayoría de las plantas el pH ideal se encuentra entre 6.0 y 7.0, ya que dentro estos valores los nutrientes se encuentran disponibles y hay una fácil asimilación de éstos (Buckman y Brady, 1985; Marín *et al.*, 2002).

Debido al efecto amortiguador que presenta la materia orgánica en el suelo y al contenido de bases en el estiércol adicionado como enmienda, se espera que el material presente diferencias en los valores de pH. De igual manera el pH se ve afectado por la actividad de la rizosfera, que favorece el intemperismo del tepetate con la consecuente liberación de bases al medio (Fassbender, 1975; Flores *et al.*, 2011).

Materia orgánica

La materia orgánica del suelo (MOS) está constituida por restos vegetales como hojas, cortezas, frutos y residuos de origen animal. Los organismos vivos como gusanos, hongos, y bacterias también son considerados parte de la materia orgánica del suelo (Bohn, 1993; Marín *et al.*, 2002).

La adición de materia orgánica al suelo se encuentra muy relacionada con la actividad microbiana, ya que la materia orgánica por sí misma no tiene un efecto significativo en las propiedades del suelo y la presencia de microorganismos no resulta efectiva si no es por la presencia de materia orgánica, la cual funciona como fuente de energía para los microorganismos. Cuando se encuentran estos dos factores en el suelo ocurre una gran

actividad microbiana, aumenta el número de la población así como los productos residuales derivados de la descomposición gracias a su proceso metabólico. De esta forma se contribuye a los procesos bioquímicos del suelo (Aguilera, 1989; Baver, 1991).

La descomposición de la materia orgánica implica la oxidación del carbono a través de organismos heterótrofos, este proceso continúa siempre y cuando los factores implicados como oxígeno, agua, temperatura y nutrientes estén presentes en niveles adecuados para los microorganismos descomponedores (Bonh, 1993).

Cuando los restos vegetales son descompuestos por actividad microbiana se genera el humus, el cual es un material orgánico que los microorganismos han transformado en una forma más estable. Éste está compuesto por sustancias húmicas y no húmicas. Las sustancias húmicas corresponden a los ácidos flúvicos y húmicos, sustancias sintetizadas por los microorganismos del suelo. Las sustancias no húmicas corresponden a tejidos y componentes parcialmente descompuestos constituidos principalmente por carbohidratos, proteínas, glúcidos, lípidos, aminoácidos y ligninas. Los mohos y bacterias consumen dichos compuestos formando principalmente CO_2 , H_2O y en menor proporción NH_3 , H_2S , SO_2 y ácidos orgánicos (Bonh, 1993; Marín *et al.*, 2002).

La presencia de materia orgánica influye en las características físicas químicas y biológicas del suelo. La materia gruesa que se encuentra en la superficie del suelo permite reducir la fuerza del impacto del agua, evitando la erosión (Tamhane, 1978).

Una de las principales características del suelo que es favorablemente afectada es la estructura, ya que las sustancias orgánicas producto de la descomposición de la materia orgánica, facilitan la formación de agregados en el suelo favoreciendo la aireación y permeabilidad; las plantas que son un aporte importante de materia orgánica proveen de canales al suelo cuando las raíces mueren y se pudren. También aumenta la capacidad de retención de agua evitando pérdidas por evapotranspiración. Se sabe que al descomponerse la materia orgánica genera ácidos orgánicos y CO_2 que ayudan a disolver minerales para dejarlos disponibles para las plantas y que equilibra cambios en el pH causado por la agregación de sal y fertilizante (Tamhane, 1978).

Los productos metabólicos generados a partir de la descomposición de residuos de cosecha y de estiércol son elementos muy importantes en la estructuración del suelo, proceso fundamental para la retención de humedad y la fácil exploración radical de las plantas. Además de ser fuentes de abastecimiento nutricional para los cultivos son la fuente energética que permite a los microorganismos del suelo crecer y desarrollarse aumentando la formación de biomasa microbiana (Etchevers, 1998).

Si se pretende reincorporar a los tepetates a la actividad agrícola es imprescindible proveer de nitrógeno orgánico a este material, lo cual se puede conseguir a partir de residuos de cultivos, estiércol entre otras fuentes de materia orgánica (Etchevers, 1998).

Por lo tanto, al adicionar materia orgánica en forma de estiércol a los tepetates para un fin productivo, se espera que los niveles bajos en contenido de materia orgánica y otros nutrientes aumenten proporcionalmente. De igual manera el sistema radical propiciará el

aumento del contenido de materia orgánica por los compuestos liberados y por los restos de raíces que al morir se reincorporan al material (Velázquez et al., 2001; García et al., 2008).

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico es definida como la suma de los cationes intercambiables, los cuales pueden ser adsorbidos por unidad de peso o volumen del suelo (Cadahia, 2005).

Los materiales minerales menores a 2 micras junto con la materia orgánica, especialmente sustancias húmicas, forman una micela coloidal, la cual tiene cargas negativas capaces de adsorber cationes (K^+ , Ca^{2+} , Na^+ y Mg^{2+}) (Rodríguez, 2002; Cadahia, 2005).

La CIC depende fundamentalmente de la naturaleza del mineral arcilloso que conforma el suelo, el tamaño de la partícula y de los componentes orgánicos del suelo (Rodríguez, 2002).

Una CIC elevada significa que el suelo cuenta con una reserva de nutrimentos abundante para las plantas, de lo contrario no es posible retener una cantidad adecuada de nutrimentos y se requiere la aplicación frecuente de fertilizantes (Cadahia, 2005).

Cuando la CIC es mayor de $25 \text{ Cmol}^+ \text{ Kg}^{-1}$ de suelo se considera que la reserva nutrimental es abundante según la NOM -021-RECNAT- 2000.

Se han reportado valores en la capacidad de intercambio catiónico de medios a altos en tepetates, esto lo relacionan con la presencia de amorfos, o bien por el tipo de arcilla presente en el material; por lo tanto se espera encontrar valores altos en esta determinación. Sin embargo, debido a la acción de la planta, la adición de estiércol y la variación del pH de la solución del suelo, podrían variar dichos valores (Acevedo et al., 2003; Atilano, 2014).

Bases intercambiables

Las bases intercambiables son cationes que se generan por la meteorización del material parental, de la mineralización materia orgánica y de aportes externos.

Los cationes intercambiables más comunes son menos de diez y su presencia depende de las condiciones del medio. Los cationes más frecuentes son $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$ (Porta, 1999).

En la habilitación de tepetates, las especies vegetales provocan una diferencia en las concentraciones de bases intercambiables al absorber los nutrimentos. De igual manera el contenido de bases puede variar gracias a los aportes de las enmiendas aplicadas (García et al., 2008). En general los principales cambios esperados en esta determinación son diferencias en la concentración de bases causado por la adición de estiércol y en

menor proporción por el intemperismo de feldspatos y micas, que conforman el material (Flores *et al.*, 2011).

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) de mezclas de suelo-agua indica la cantidad de sales solubles presentes. Todos los suelos y materiales volcánicos, contienen algo de sales, las cuales son esenciales para el crecimiento de las plantas. Sin embargo un exceso de sales inhibe el crecimiento de las mismas al afectar el equilibrio suelo-agua y puede provocar toxicidad por la presencia de iones específicos como cloro, boro, y en algunos casos sodio. Los iones generalmente asociados con salinidad son Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+ (cationes) ó NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , OH^- (aniones) (González, 2013).

La CE está influenciada por una combinación de propiedades físico-químicas del suelo, como pueden ser la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, humedad del suelo, capacidad de intercambio catiónico, salinidad, pH, Ca^{+2} y Mg^{+2} , tipos de suelo, entre otras (González, 2013).

La CE permite clasificar un suelo como salino, sódico o salino sódico.

Los suelos salinos suelen contener más del 0.2 % de sales solubles y el pH oscila entre 7.3 y 8.5. Los valores de CE son mayores a 4dSm^{-1} y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) es menor al 15%. La presencia de de sales eleva la presión osmótica y dificulta o imposibilita la absorción de agua por parte de las plantas. Los suelos salinos son fáciles de recuperar solo con el lavado (Thompson, 1988).

Los suelos sódicos poseen más de 15 % de sus sitios de intercambio ocupados por iones Na^+ (PSI), pero son pobres en sales solubles. Presentan un pH de 8.5 a 10 o más debido al Na^+ . Hay dispersión de las partículas y se destruye la estructura del suelo (Thompson, 1988).

Los suelos salino-sódicos presentan valores de CE mayores de 4dSm^{-1} , PSI mayor de 15 % y pH por encima de 8. Al igual que los suelos sódicos, el Na^+ provoca dispersión de las partículas, destruyendo la estructura del suelo y a diferencia de los suelos salinos, éstos se arruinan si son lavados sin antes aplicar una enmienda al suelo (Thompson, 1988).

3.5. Estrategias para mejorar la calidad del suelo

3.5.1. Enmiendas orgánicas - estiércol

Con fines agrícolas, un suelo requiere de un buen manejo y mantenimiento para sostener su capacidad productiva. Es por eso que se implementan acciones que ayudan a evitar la pérdida de nutrimentos y de materia orgánica, así como aumentar la biodiversidad edáfica para la mejora del cultivo y del suelo (Álvarez *et al.*, 2010). En consecuencia la aplicación de abonos orgánicos (estiércol, composta y residuos de cosecha) se ha practicado desde

tiempos remotos por la gran influencia que tiene sobre la fertilidad de los suelos (Espinoza *et al.*, 2009).

El uso de estiércol en la agricultura permite que el suelo conserve su fertilidad y aumente el rendimiento en los cultivos. Así el estiércol aporta varios de los nutrimentos esenciales para las plantas, ya que los aporta en forma gradual, lo que favorece la disponibilidad para el desarrollo de las plantas. Además, aporta carbono orgánico que es utilizado como fuente de energía por los organismos del suelo, libera bióxido de carbono (CO₂) durante su descomposición que forma ácido carbónico (H₂CO₃) lo que ayuda a solubilizar los nutrimentos de otras fuentes (SAGARPA, sin año).

Debido a que el nitrógeno es un nutriente ausente en los tepetates y que es un elemento básico para la nutrición de los cultivos, es necesario crear reservorios de nitrógeno orgánico a partir de la adición de estiércol (Etchevers *et al.*, 1998).

A diferencia de los fertilizantes minerales o químicos, el nitrógeno queda disponible gradualmente después de un proceso de biodegradación denominado mineralización. La mineralización de los elementos orgánicos en los estiércoles es regulada por diferentes factores como pH, temperatura, contenido de agua y arcilla en el suelo, así como de la biomasa, y actividad de las comunidades microbianas del suelo (Nett *et al.*, 2010).

Salazar *et al.* (2010) reporta que la tasa de mineralización del N puede alcanzar hasta 50% durante el año de aplicación; mientras que Álvarez *et al.* (2010) reporta una tasa de mineralización de nitrógeno cercana al 10 %.

La diferencia que existe entre el estiércol y los fertilizantes químicos es que el estiércol afecta favorablemente las características físicas, químicas y biológicas del suelo; además aporta nutrimentos esenciales para las plantas, y materia orgánica (Salazar *et al.*, 2010).

La aplicación de estiércol es un componente importante en la habilitación del tepetate, se sabe que favorece la agregación y estabilidad de agregados, la porosidad, aireación y la capacidad para la retención de agua, reduce la densidad aparente, eleva la capacidad de intercambio catiónico del suelo evitando que los nutrimentos se pierdan por lixiviación, aumenta la conductividad hidráulica y la infiltración del agua, de esta forma se reduce el escurrimiento superficial (Salazar *et al.*, 2010).

Su efecto en el suelo y en los cultivos depende del contenido nutrimental del estiércol, este varía según la especie productora, edad del animal, eficiencia digestiva, tipo de alimentación y el manejo en la recolección y almacenamiento (Espinoza *et al.*, 2009). La tabla 1 muestra el contenido de humedad y nutrimentos en el estiércol de diferentes especies animales.

Tabla1. Composición química de clases de estiércoles

	Tipo de estiércol				
	Vacuno	Gallinaza	Porcino	Equino	Caprino
Humedad (%)	36.0	30.0	20.0	25.0	18.0

pH (relación 1:2)	8.0	7.4	7.2	7.0	7.5
Materia orgánica (%)	70.0	70.0	68.0	60.0	55.0
Nitrógeno total (%)	1.5	3.7	3.7	1.2	2.5
Fósforo (%)	0.6	2.2	2.0	0.2	0.6
Potasio (%)	2.5	2.7	30.0	2.5	2.2
Calcio (%)	3.2	5.7	7.5	6.0	8.0
Magnesio (%)	0.8	1.0	2.3	0.2	0.2
Sodio (%)	1.6	1.1	0.3	0.1	0.1
Zinc (ppm)	130.6	516.0	-	-	-
Manganeso (ppm)	264.0	474.0	-	-	-
Hierro (ppm)	<354	4,902.0	-	-	-
Relación C/N	26.0	11.0	13.0	33.0	18.0
Mineralización (% 1er. año)	35.0	90.0	65.0	30.0	32.0

(SAGARPA, sin año. Recurso en línea. Fecha de consulta: 17 de noviembre del 2014).

Cuando se adiciona estiércol al suelo es importante vigilar el aumento de algunos iones que pueden resultar tóxicos para los cultivos (vg. sodio) cuando alcanzan concentraciones no deseadas. Se ha visto que un uso excesivo de estiércol se ha relacionado con problemas de salinidad y acumulación de nutrientes como el fósforo, afectando negativamente la fertilidad y generando sodificación del suelo (Salazar *et al.*, 2010. Ramos, 2002).

3.5.2. Fertilizantes minerales o inorgánicos

Los fertilizantes minerales son elaborados principalmente por procesos industriales, éstos pueden aportar macro y micro nutrientes. Suelen clasificarse en fertilizantes simples, aquellos que solamente suplen un nutrimento y fertilizantes complejos aquellos que suministran varios (FAO, 1999).

A diferencia de los abonos orgánicos, la aplicación de fertilizantes para la producción agrícola data solo de aproximadamente cien años (Buckman y Brady, 1985).

Los fertilizantes aportan nutrientes a las plantas de forma directa a diferencia de otras enmiendas. La aplicación de fertilizantes trae al agricultor una gran ventaja en la cantidad y calidad de la producción de alimentos (Thompson, 1988).

Cuando se extrae la masa vegetal producida con fines agrícolas, se extraen también los nutrimentos del suelo que fueron tomados por las plantas, de esta forma se rompe el ciclo natural de los nutrientes impidiendo que estos se reincorporen de forma natural al suelo. Como consecuencia, la provisión de nutrientes se va agotando y el rendimiento de los próximos cultivos se ve disminuido. Aunque la meteorización de los minerales del suelo

aporta nutrientes, éstos son insuficientes para contrarrestar las pérdidas por la recolección de los cultivos (Thompson, 1988).

Según Avilés (2013), los tres principales elementos que aportan al suelo se pueden agrupar en:

- Fertilizantes nitrogenados: son los que proporcionan nitrógeno como lo amoniacales (sulfato de amonio, nitrato de amonio y urea) y los que están hechos a base de nitratos (nitrato de sodio, nitrato de calcio y nitrato de potasio).
- Fertilizantes fosfatados: son fuente de ácido fosfórico asimilable como el superfosfato de calcio simple y superfosfato de calcio triple.
- Fertilizantes potásicos: los que contienen potasa soluble en agua como el cloruro de potasio y el sulfato de potasio.

Es importante conocer los requerimientos del cultivo y las capacidades del suelo para hacer un uso adecuado de los fertilizantes y realizar una aplicación con la dosis adecuada ya que no todos los nutrimentos aportados por los fertilizantes minerales son absorbidos por las plantas y estos pueden perderse por escorrentía y lixiviación contaminando cuerpos de agua subterránea y superficial (FAO, 1999).

3.5.3. *Sorghum bicolor* (L.) Moench como variable experimental

La especie *Sorghum bicolor* (L.) Moench constituye un cultivo de gran importancia, tanto económica, por su incremento del consumo en el país, como alimenticio por sus características nutricionales semejantes al del maíz; por lo que es considerado como un sustituto del mismo. Además de ser una planta capaz de adaptarse a ambientes difíciles y a cualquier tipo de suelo, es capaz de tolerar la falta de humedad y ciertas reacciones químicas en el suelo. En el anexo I se menciona con detalle las características, así como información general de esta especie.

Tomando en cuenta que el tepetate presenta características limitantes para el desarrollo vegetativo, es necesario considerar la selección de una especie vegetal capaz de tolerar las dificultades edáficas que conlleva este sustrato. Es por eso que se seleccionó el cultivo de *Sorghum bicolor* para la realización de este experimento (Flores D., comunicación personal, 2013), ya que por su adaptación a ambientes hostiles, su rápido desarrollo y la gran resistencia que presenta, la hacen una variable para probarla como un factor de alteración en las características físicas y químicas del tepetate.

4. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Las zonas volcánicas donde comúnmente aflora el tepetate (vg. eje neovolcánico transversal), son consideradas como zonas frágiles, por ser susceptibles a diferentes procesos de erosión, debido a los tipos de suelos presentes (vg. Andosol, Cambisol, Feozem, Leptosol, Luvisol, planosol y regosol) y al relieve irregular que predomina en el área (vg. sierras, lomeríos y valles) (SEMARNAT, 2008).

La problemática asociada a la presencia de capas endurecidas reside en la constante degradación del suelo, la cual se incrementa sistemáticamente, resultado de diferentes procesos de erosión ocasionada, principalmente, por la actividad antropogénica. Los tepetates, debido a sus características físicas y químicas son susceptibles a problemas de erosión y aridez, por lo que contribuyen al problema de la degradación del suelo y del medio ambiente (Velázquez, 2002; Gama *et al.*, 2007).

Se estima que en el país, los suelos degradados ascienden cerca del 15% de la superficie, lo que genera pérdidas económicas por erosión de 18.8 millones de pesos al año (SEMARNAT, 2008).

Actualmente, la demanda en el país por alimentos y materias primas continúa aumentando, lo que genera una presión creciente sobre los recursos naturales. Tal es el caso de los suelos fértiles, los cuales experimentan un alto grado de deterioro. Especialmente si se toma en cuenta que solamente el 19 % del territorio nacional es apto para la agricultura (SEMARNAT, 2008).

Es por eso que es de gran importancia seguir realizando trabajos para conocer las condiciones y tendencias de degradación, así como, el manejo adecuado del recurso y el desarrollo de prácticas de habilitación en tepates para su incorporación a la actividad agrícola y forestal.

5. JUSTIFICACIÓN

Para la habilitación de los tepetates, éstos se cultivan con especies vegetales capaces de resistir a las condiciones poco favorables que propician las características de este material (vg. eucalipto, maguey mezcalero, pasto *Rhodes*); sin embargo, es necesario considerar que los cultivos establecidos deben tener un valor económico o ambiental importante y que sea redituable en el menor tiempo posible (Atilano, 2014).

Con esas bases, el presente trabajo de tesis, utiliza el cultivo de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) para encontrar la combinación idónea de enmienda y especie vegetal que ofrezca una mejor respuesta a corto plazo.

El sorgo, debido a sus características, es de interés por su rápido desarrollo, es capaz de adaptarse a un amplio rango en la escala de pH, es resistente a ambientes secos y puede ser cultivado en lugares donde la precipitación media anual es de 300 a 350 mm. Es por eso que es un cultivo importante en áreas con escasas precipitaciones, donde no se puede sembrar maíz (Bogdan, 1997).

El sorgo es de gran importancia para el país, ya que se utiliza como materia prima para la industria de alimentos para aves, porcinos y bovinos, entre otros (Castro, 2012). El sorgo también tiene diferentes usos industriales importantes como la producción de cerveza, adhesivos, tinte, resinas, etanol y combustible. Además de tener buenos rendimientos tiene beneficios agronómicos a cultivos subsecuentes en un sistema de rotación de cultivos (Shiringani, 2005).

6. OBJETIVOS

General:

Cuantificar en invernadero, los cambios de algunas características físicas y químicas de un tepetate por efecto del cultivo de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), así como, por la adición de estiércol bovino y fertilizante químico; para mejorar su calidad productiva.

Particulares:

- Determinar de modo analítico, los cambios de algunas características químicas (pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, porcentaje de saturación de bases, cationes intercambiables, conductividad eléctrica e índices de inemperismo) en el tepetate y determinar si son favorables para su habilitación.
- Determinar de modo analítico, los cambios de algunas características físicas (clases de tamaño de partícula, estabilidad de partículas en húmedo, color, clase textural, densidad real, densidad aparente y desleimiento) en el tepetate y determinar si son favorables para su habilitación.
- Estimar el efecto de los tratamientos empleados, sobre el desarrollo de la especie cultivada, determinando su biomasa aérea y subterránea.
- Determinar el efecto de las enmiendas sobre las características micromorfológicas del tepetate, bajo condiciones de invernadero.

7. HIPÓTESIS

La adición sistemática al tepetate de estiércol bovino y fertilizante químico, así como el cultivo de una especie vegetal resistente y agresiva (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), inducirán en este material, las condiciones favorables para una posterior y gradual formación de agregados; propiciará un medio con condiciones pedogenéticas adecuadas para el desarrollo de plantas y promoverán la fertilidad, favoreciendo su habilitación.

Los tratamientos a los que se adicionará el estiércol bovino y fertilizante químico, permitirán una mayor producción de biomasa en el cultivo de sorgo.

8. Metodología

Durante el desarrollo de esta tesis, fueron implementados diferentes trabajos de gabinete, laboratorio, e invernadero. Todos ellos fueron realizados en las instalaciones del departamento de edafología, ubicado en el Instituto de Geología, UNAM.

Dichos trabajos incluyen las siguientes etapas:

8.1. Observaciones y ubicación del material (tepetate)

El tepetate utilizado, así como las muestras obtenidas a partir de él, constituyen materiales previamente trabajados, ya que fueron analizados y sometidos a tratamientos experimentales por García (2005) y Flores (2013). Esto implica que se trata de un tepetate cuyo testigo, fue previamente trabajado, y probablemente alterado, aunque solo desde un punto de vista físico (fragmentación mecánica).

De acuerdo con la definición de Flores y Ferrera (1997), el material reúne las características diagnósticas (densidad aparente alta, baja porosidad, baja conductividad hidráulica, bajas concentraciones de nitrógeno, fosforo y materia orgánica) para ser considerado como un tepetate, formado a partir de cenizas volcánicas, con características físicas y químicas que limitan su uso agrícola (Tabla 2).

Tabla 2. Se muestran algunas características físicas y químicas determinadas sobre el tepetate en estado inicial y sin alterar (García, 2005).

Color		Textura	pH (H ₂ O)	M.O.	CIC	Ca	Mg	Na	K	S.B.
Seco	Húmedo		(1:2.5)	(%)	-----	(Cmol ⁺ kg ⁻¹)			-----	(%)
10YR7/6 amarillo	10Y/R4/4 pardo amarillento oscuro	franca con 29% arena, 44% limo y 25% arcilla	6.73	0.11	19.4	7.33	4.67	0.12	0.29	83.38

El tepetate fue colectado a 8 km del municipio de Tetela del Volcán, localizado al noroeste del estado de Morelos y se ubica geográficamente, entre los 18°57'48" norte y 99°15'12" oeste, a 2040 msnm. (Figura 1).

El clima se caracteriza por ser templado subhúmedo, con una precipitación total anual de 1885 mm y la temperatura media anual es de 17.2 °C. En general, el tipo de vegetación de la zona corresponde a bosque de pino-encino, sin embargo, existe un alto grado de perturbación antropogénica, debido al cambio de uso de suelo, principalmente a la incorporación de los suelos, con aptitud estrictamente forestal, a la actividad agrícola (García, 2005).

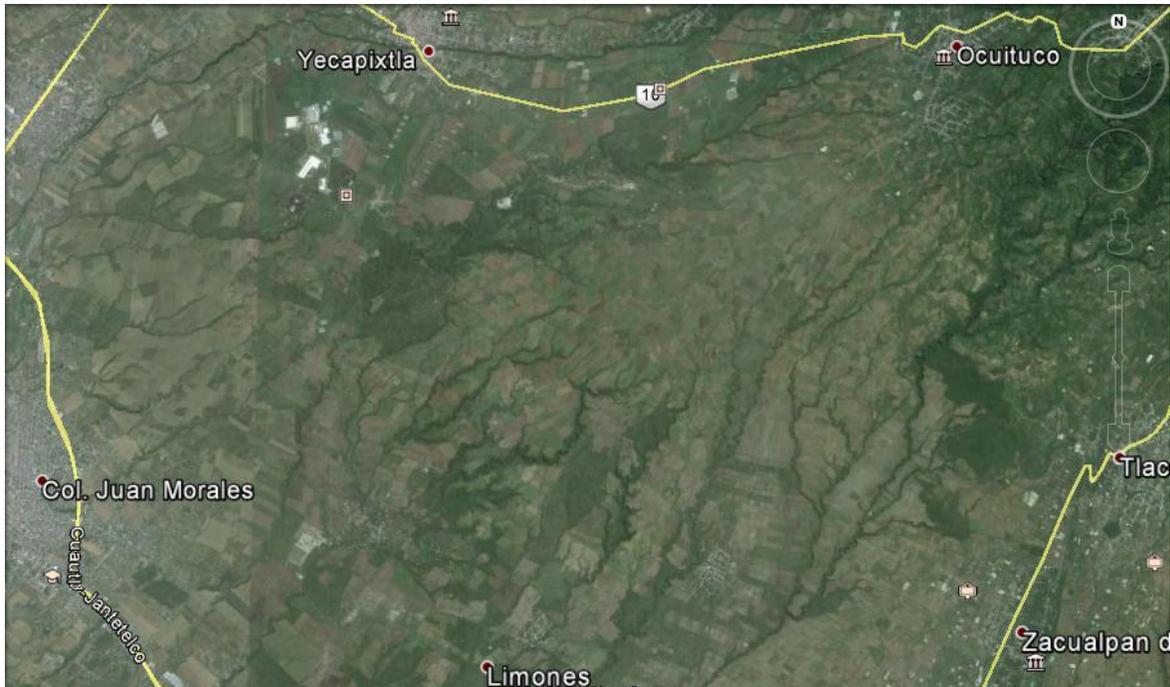


Figura 1. Vista aérea de la zona donde se recolectó el material. Escala 1:500

8.2. Diseño experimental en invernadero

El desarrollo del experimento se planeó con diseño bifactorial de 3x4, 12 tratamientos (Tabla 3), con 4 repeticiones cada uno, lo que equivale un total de 48 unidades experimentales.

Para este experimento se consideraron los siguientes factores:

Planta, con las siguientes variables: (1) ausencia de planta, (2) presencia de planta y (3) presencia de planta con fertilizante químico. (El fertilizante empleado fue sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ en dosis de 160 kg de N/ha en dos cortes).

Estiércol bovino administrado en cuatro dosis: (1) sin estiércol, (2) dosis baja (24 Mg/ha), (3) dosis media (48 Mg/ha) y (4) dosis alta (72 Mg/ha).

Tabla 3. Tratamientos establecidos durante el experimento

No.	Planta	Estiércol (Mg/ha)	Descripción	Clave
1	Sin	0	Testigo absoluto	TAB
2	Sin	24	Testigo con dosis baja	TB
3	Sin	48	Testigo con dosis media	TM
4	Sin	72	Testigo con dosis alta	TA
5	Planta	0	Planta sin estiércol	P
6	Planta	24	Planta con dosis baja	PB
7	Planta	48	Planta con dosis media	PM
8	Planta	72	Planta con dosis alta	PA
9	Planta+ fertilizante	0	Planta + fertilizante sin estiércol	PF
10	Planta+ fertilizante	24	Planta + fertilizante con dosis baja de estiércol	PFB
11	Planta+ fertilizante	48	Planta + fertilizante con dosis media de estiércol	PFM
12	Planta+ fertilizante	72	Planta + fertilizante con dosis alta de estiércol	PFA

8.3. Descripción del experimento

El experimento se realizó durante nueve meses. Bajo condiciones controladas en el invernadero. Cada tratamiento fue sometido a riego con agua de uso común de C.U., dos veces por semana con aproximadamente 500 ml. El promedio de temperatura en el invernadero, durante un lapso de nueve meses, fue de 20.13 C°, la humedad relativa fue de 56.70 % y la radiación solar de 20.41 W/m².

Inicialmente el tepetate utilizado en esta tesis (aprox. 480 kg) se fragmentó de forma manual y se pasó por tamices para obtener terrones con un diámetro de entre 2.0 a 10.0 mm de diámetro. Se utilizaron cubetas con capacidad de 20 L, como unidades experimentales, las cuales fueron etiquetadas, de acuerdo al tratamiento correspondiente (Tabla 3) y llenadas con aproximadamente 20 kg de tepetate roturado. Se sembraron 5 semillas por cubeta y se agregó el fertilizante químico (NH₄)₂SO₄.

Una vez que la planta llegó a la etapa de floración (4 meses aproximadamente), se realizó un corte en la base del tallo y se aplicó la dosis de fertilizante químico restante. Cuando la planta alcanzó, nuevamente, la etapa de floración, se realizó el segundo corte y se sustrajo la parte de la biomasa subterránea (raíces).

Al finalizar la fase experimental, se obtuvieron muestras homogéneas de cada tratamiento, éstas fueron secadas al aire o, alternativamente, en estufa, a un máximo de 40 °C. La fracción fina se obtuvo tamizando la muestra seca con un tamiz de 2 mm y 0.5 mm. Las partículas que no pasaron por el tamiz, fueron disgregadas y tamizadas nuevamente.

8.4. Análisis generales de laboratorio

En la tabla 4 se presentan tres columnas que en conjunto constituyen un esquema del diseño metodológico empleado en laboratorio para realizar los análisis.

Tabla 4. Métodos y técnicas empleados para los análisis generales

ANALISIS	MÉTODO	OBSERVACIONES
pH en agua relación 1:2.5	(Sparks, 1996)	Método del potenciómetro (Orión modelo 920A)
Materia orgánica (%)	Walkley y Black.- SEMARNAT, (2002)	Por el método de oxidación vía húmeda con dicromato de potasio (K ₂ Cr ₂ O ₇) en medio ácido
C.I.C. (Cmol ⁺ /kg ⁻)	Jackson, (1970)	El catión índice se cuantificó por titulación con EDTA
Saturación de bases	(NOM-021- RECENAT-2000)	Se calculó utilizando la siguiente ecuación: % S.B. = $\frac{(Ca^{++} + Mg^{++} + Na^{+} + k^{+})}{C.I.C.} 100.$
Cationes intercambiables	Sparks, (1996).	Extracción con acetato de amonio 1NpH 7. Determinando Ca y Mg por titulación con EDTA y Na y K con flamómetro (CORING, modelo 400)
Relación Ca: Mg	(Landon, 1984)	Se realizó dividiendo la concentración de magnesio sobre calcio.
Conductividad eléctrica	(Sparks D., 1996)	Se determinó mediante un conductímetro (LaMotte modelo Con 6) utilizando una relación suelo-agua 1:1.25
Clases de tamaño de partículas	(Kemper y Rosenau, 1986)	Por tamizado en cribas de diferente apertura
Estabilidad de las Partículas		Por tamizado en húmedo de las partículas en cribas de diferente apertura
Color	(Munsell Soil Chart, 1975)	Se determinó con las tablas de color Munsell. En muestras en seco y húmedo
Clase textural	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2010)	Triángulo de texturas
Densidad real	(A.S.T.M., 1958)	Método del picnómetro

Densidad aparente (BD)	(Baver <i>et al.</i> , 1973)	Técnica de la probeta
Desleimiento: Estabilidad de los agregados sumergidos en agua	(Siebe <i>et al.</i> , 1996)	Por inmersión de los agregados en agua y posterior agitación por 30 segundos

8.5. Análisis selectos de laboratorio

Este rubro incluye: (i) óxidos de elementos mayores, (ii) Índices de intemperismo, (iii) análisis mineralógico y (iv) análisis micromorfológico y morfométrico de agregados (Tabla 5).

Tabla 5. Métodos empleados para los análisis selectos de laboratorio

ANALISIS	MÉTODO	OBSERVACIONES
Óxidos de elementos mayores.	USDA (1996)	Los óxidos de elementos mayores se hicieron por fluorescencia de rayos X (FRX).
Índices de intemperismo	Duzgoren-Aydin <i>et al.</i> (2002).	<ul style="list-style-type: none"> •SA (sílice / alúmina) •ba ($K_2O + Na_2O / Al_2O_3$) •Parker[$(Na/0.35) + (Mg/0.9) + (K/0.25) + (Ca/0.7)]$ / 100 •CIA (Chemical index of alteration) $100 \times Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)$ •Ba: R_2O_3 (Bases / sesquióxidos) $(K_2O + Na_2O + CaO + MgO) / (Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2)$
Análisis mineralógico	(Starkey <i>et al.</i> , 1984)	Mineralogía de la muestra total y de la fracción de arcilla fina menor a 2 μm se obtuvo por difracción de rayos X en un difractor
Observación de agregados (forma-	(Bullock <i>et al.</i> , 1985).	La micromorfología y morfometría se determinó por medio de observaciones de láminas delgadas bajo un

tamaño, cantidad)		microscopio petrográfico.
Índices de calidad	Altieri and Nicholls (2002).	Se asignó a cada índice un valor de 1 a 10. En el que, 1 corresponde al valor menos deseable, 5 un valor moderado o medio y 10 el valor más adecuado.

8.5.1. Óxidos de elementos mayores

Un gramo de muestra compuesta (4 repeticiones de 12 tratamientos) se pasó por un tamiz de 0.0625 mm de apertura, se fundieron en base seca (a 950°C) y se analizó por fluorescencia de rayos X, la cuantificación utilizó el programa CONTROLM.QAN.

8.5.2. Índices de intemperismo

Se evaluaron cinco índices de intemperismo: el índice de Parker (IP), relación sílice-aluminio (SA), el índice alteración química (CIA), la relación bases-alúmina (Bases/Alúmina), y la relación bases-sesquioxidos (Bases/R₂O₃). Se calcularon de la siguiente manera:

- $IP = K_2O/pm/0.25 + Na_2O/pm/0.35 + CaO/pm/0.7 + MgO/pm/0.9$
- $SA = SiO_2/pm / Al_2O_3/pm$
- $CIA = Al_2O_3/pm / (Al_2O_3/pm + K_2O/pm + Na_2O/pm + CaO/pm) * 100$
- $Bases/Alúmina = (K_2O/pm + Na_2O/pm + CaO/pm + MgO/pm) / Al_2O_3/pm$
- $Bases/R_2O_3 = (K_2O/pm + Na_2O/pm + CaO/pm + MgO/pm) / (Al_2O_3/pm + Fe_2O_3/pm + TiO_2/pm)$

pm= peso molecular del compuesto.

8.5.3. Análisis mineralógico. Mineralogía de la muestra total y de la fracción de arcilla fina menor a 2 µm.

Se realizó en el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México y se obtuvo por medio de difracción de rayos X con un difractómetro Shimadzu XRD-600, con tubo de cobre de foco fino y monocromado.

Las muestras de tepetate se homogeneizaron, siendo finamente pulverizadas. La muestra molida se colocó en un porta muestras de aluminio y se introdujo en un difractómetro de

rayos X, donde la muestra se sometió a la acción de la radiación donde incide de forma continua con distintos ángulos, (4 a 70° (2 θ)) con velocidad de 2°/minuto.

En la mineralogía de la fracción menor, se realizaron diversos tratamientos: con etilenglicol, calentamiento a 550° y formamida para identificar mejor las fases.

Para estas determinaciones se seleccionaron dos muestras de tepetate que corresponden al testigo absoluto (TAB) y planta con fertilizante con dosis alta de estiércol (PFA). La selección fue hecha para comparar la muestra inalterada y la muestra que tuvo los efectos de los diferentes factores del experimento (Tabla 6).

Tabla 6. Tratamientos seleccionados para análisis de mineralogía por difracción de Rayos X.

No.	Planta	Estiércol (Mg/ha)	Descripción	Clave
1	Sin	0	Testigo absoluto	TAB
2	Planta + fertilizante + estiércol	72	Planta + fertilizante con dosis alta de estiércol	PFA

8.5.4. Análisis micromorfológico y morfométrico de agregados

Se elaboró en el taller de laminación del Instituto de Geología UNAM, una lámina delgada pulida correspondiente al tratamiento: planta con fertilizante y dosis alta de estiércol (PFA). La finalidad fue analizar la muestra que tuvo efectos de los diferentes factores del experimento, además de que presentó agregación.

Para la elaboración de la lámina delgada se tomaron agregados encontrados en las macetas correspondientes al tratamiento PFA, realizando preparaciones de muestras compuestas (Figura 2).



Figura 2. Agregados presentes en el tratamiento PFA (planta con fertilizante y dosis alta de estiércol) en la fracción mayor a 10 mm, para la elaboración de la lámina delgada.

- Análisis micromorfológico

La micromorfología se determinó por medio de la observación de una lámina delgada bajo un microscopio petrográfico (Olympus BX 51) utilizando el objetivo 4x, bajo luz polarizada y mediante el software Image-Pro Plus 5.1.

- Análisis morfométrico

La morfometría se realizó mediante la obtención de una imagen de la lámina delgada correspondiente al tratamiento PFA, por escáner (Olympus BX 51) de alta resolución y con ayuda del software Image-Pro Plus 5.1.

A partir de la imagen se seleccionó un área determinada y se realizó la medición del área, de los poros, agregados, y concreciones de hierro, encontradas en las láminas.

8.6. Selección de los índices de calidad

De los análisis realizados (Tabla 4), fueron utilizados como índices de calidad los siguientes: (1) potencial de hidrógeno (pH) en agua; (2) materia orgánica (MO); (3) capacidad de intercambio catiónico (CIC); (4) saturación de bases intercambiables (concentración de calcio Cmol^+kg^- ; concentración de magnesio Cmol^+kg^- ; concentración de potasio Cmol^+kg^- ; concentración de sodio Cmol^+kg^-); (5) relación Ca: Mg; (6) conductividad eléctrica; (7) agregados y (8) desleimiento.

8.7. Determinación de la biomasa del sorgo

Al finalizar ambos cortes, se registró el peso de la materia seca por tratamiento, para ello, se secaron en estufa a 60 °C hasta obtener un peso constante. Se determinó el peso seco de la biomasa aérea (tallos y hojas), subterránea (raíces) y biomasa total (biomasa aérea + subterránea).

8.8. Análisis estadísticos

Para la evaluación de las características físicas y químicas del tepetate, se realizó un análisis de varianza, utilizando la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) en las medias con el programa JMP-Statistical Discovery Software, versión 5.1, (2002).

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1. Análisis de las características químicas del tepetate

9.1.1. Potencial de hidrógeno (pH) en agua

Los resultados mostrados en la tabla 7 indican que existen, entre algunos tratamientos, diferencias estadísticamente significativas en los valores de pH.

Tabla 7. Valores de pH en agua de los tratamientos establecidos.

Tratamiento	pH	Tratamiento	pH	Tratamiento	pH
TAB	6.47 ± 0.25 d	P	7.01 ± 0.15 abcd	PF	6.68 ± 0.16 cd
TB	6.75 ± 0.42 cd	PB	7.19 ± 0.13 abc	PFB	6.82 ± 0.18 bcd
TM	6.88 ± 0.09 bcd	PM	7.12 ± 0.23 abc	PFM	6.99 ± 0.21 abcd
TA	7.34 ± 0.29 ab	PA	7.48 ± 0.21 a	PFA	7.06 ± 0.10 abc

Valores con letras diferentes son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=4$; con su desviación estándar. Donde: TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

Los tratamientos que no contienen estiércol son semejantes entre sí, junto con los tratamientos que contienen dosis media y baja de estiércol (excepto PB y PM), dichos tratamientos presentan un ligero incremento de entre 0.2 y 0.5 unidades en la escala de pH respecto al TAB.

Por otra parte, el testigo absoluto (TAB) muestra diferencias significativas entre los tratamientos que contienen planta y estiércol (PB), (PM), (PA) y los demás tratamientos con dosis alta de estiércol (TA) y (PFA).

Los valores de dichos tratamientos incrementaron respecto a TAB, esto pudo deberse al incremento de bases procedentes del estiércol, así como al efecto amortiguador del mismo (García *et al.*, 2008; Flores *et al.*, 2011).

Los cambios más significativos por encima del valor de TAB, lo presentan los tratamientos TA (testigo dosis alta de estiércol) y PA (planta con dosis alta de estiércol), con aumentos de 0.87 y 1 unidades, respectivamente.

Comparando aquellos tratamientos con planta y sin estiércol (TAB, P y PF), se logra apreciar un incremento en los valores de pH respecto al TAB. De igual manera al comparar los valores de los tratamientos con planta contra aquellos que no la tienen, se observa un incremento del pH; sin embargo, estos no son estadísticamente significativos.

Esto en principio podría parecer contradictorio, ya que la planta libera a la rizósfera protones y ácidos orgánicos como resultado de su metabolismo, por lo tanto se esperaría que en aquellos tratamientos con planta, los valores de pH decrecieran respecto a TAB. Sin embargo, se conoce que este proceso de acidificación es mucho más intenso cuando más gruesas sean las raíces (Velázquez, 2002).

Como se muestra en la tabla 7 el pH que presenta el material se puede clasificar de acuerdo con Vázquez (1997) como: ligeramente ácido en TAB; alcalino para PA (planta con dosis alta de estiércol) y neutro para el resto de los tratamientos.

Aguirre (2006), menciona que para las diferentes especies de sorgo, el intervalo óptimo de pH es de 5.0 a 6.5. El único tratamiento que entra en ese rango es TAB, los demás tratamientos, aparentemente rebasan dicho intervalo de pH para el sorgo.

En la tabla 7, se observa que el factor estiércol tiende a alcalinizar el medio, así, estos tratamientos tienden a aumentar los valores de pH conforme aumenta la dosis de la enmienda. Lo mismo es reportado en los trabajos de Flores *et al.*, 2011 y García *et al.*, 2008.

En dichos trabajos, Flores y colaboradores (2011), proponen que el aumento del pH se debe a la actividad de la planta sobre el tepetate, favoreciendo la intemperización del material lo que resultó en la liberación de bases. Sin embargo, esto resulta poco viable para explicar el incremento, dado que el grado de intemperismo inducido por los tratamientos aplicados al tepetate, durante el periodo experimental, resultó muy bajo.

En otros estudios con tepetates (García *et al.*, 2008; García *et al.*, 2007; Velázquez 2002), ocurre lo mismo, es decir; existe un ligero incremento de los valores del pH en los tratamientos con estiércol. Ellos los atribuyen a efecto amortiguador de la materia orgánica que pudo absorber los iones ácidos liberados por la planta. Sin embargo se puede inferir que el incremento de los valores de pH se debe al aporte de bases por adición del estiércol.

Por otro lado se aprecia en la tabla 7 que los tratamientos con fertilizante químico presentan valores de pH menores comparados con aquellos tratamientos con planta sin fertilizante. Esto muestra que el fertilizante tiene un efecto acidificante que es contrarrestado por el poder amortiguador de la materia orgánica (Fassbender y Bornerisza 1987); al aumentar la dosis de estiércol los valores de pH tienden a alcalinizarse.

Este efecto acidificante se puede atribuir al efecto del sulfato de amonio aplicado como fertilizante químico. El ion amonio es un compuesto acidificante, por lo que los fertilizantes amoniacales suelen dejar un residuo ácido en el suelo (Aguirre, 2001).

En otros estudio se ha reportado que el pH de los tepetates es de 6.3 hasta 7.3 (Díaz 2001; García 2005; Plancarte 2006; Flores 2011; Atilano 2014). El pH del material utilizado para este estudio se encuentra dentro de los valores obtenidos por estos autores.

En general, los valores obtenidos de pH en los tratamientos se encuentran en el rango clasificado como neutro, un rango óptimo para la disponibilidad de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre para el desarrollo vegetal, por lo que no presenta ninguna dificultad para la actividad agrícola a pesar de las variaciones que presentaron los tratamientos (Aguirre, 2006).

9.1.2. Materia orgánica (MO)

En la tabla 8 se muestran los resultados del contenido de materia orgánica en el tepetate. Se observa que todos los tratamientos superan el porcentaje del testigo absoluto, con fluctuaciones de 0.31 a 1.94 % vs 0.16 del testigo.

Tabla 8. Contenido porcentual de materia orgánica

Tratamiento	%MO	Tratamiento	%MO	Tratamiento	%MO
TAB	0.16 ± 0.07 f	P	0.31 ± 0.04 ef	PF	0.41 ± 0.08 ef
TB	0.48 ± 0.17 ef	PB	0.71 ± 0.08 ce	PFB	0.66 ± 0.11 ce
TM	0.72 ± 0.12 ce	PM	1.01 ± 0.21 cd	PFM	1.14 ± 0.13 bcd
TA	1.26 ± 0.22 bd	PA	1.94 ± 0.36 a	PFA	1.61 ± 0.41 ab

Valores con letras diferentes son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=4$; con su respectiva desviación estándar. Donde: TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

Se observa que los valores más altos corresponden con los tratamientos que presentan planta y dosis altas de estiércol (PA y PFA) siendo estadísticamente semejantes. En contraste, los tratamientos sin enmienda presentan los contenidos más pobres en materia orgánica.

El testigo es equivalente estadísticamente a los tratamientos sin estiércol (P), (PF) y al testigo con dosis baja de estiércol (TB).

Por otra parte, los tratamientos que contienen la misma dosis de estiércol también son equivalentes entre sí.

Cabe mencionar que los valores de materia orgánica registrados en este trabajo son similares a los resultados de otros estudios realizados con material proveniente de la misma zona (Avilés, 2013; Atilano, 2014).

Se observa que en aquellos tratamientos que contienen la especie vegetal sin dosis de estiércol (P y PF) presentan un incremento de 0.15 y 0.25% respecto al testigo. Aun

cuando estas diferencias no son significativas, esto muestra el aporte de materia orgánica por parte de la planta al tepetate. Esto podría explicarse por los compuestos orgánicos (exudados) que la planta libera al material, como resultado de sus procesos metabólicos (Flores *et al.*, 2011).

Como se observa en la figura 3, los valores más altos registrados son aquellos tratamientos con dosis alta de estiércol, siendo (PA) y (PFA) diferentes estadísticamente al resto de los tratamientos. Esto indica que el estiércol tiene una gran influencia en el contenido de materia orgánica.

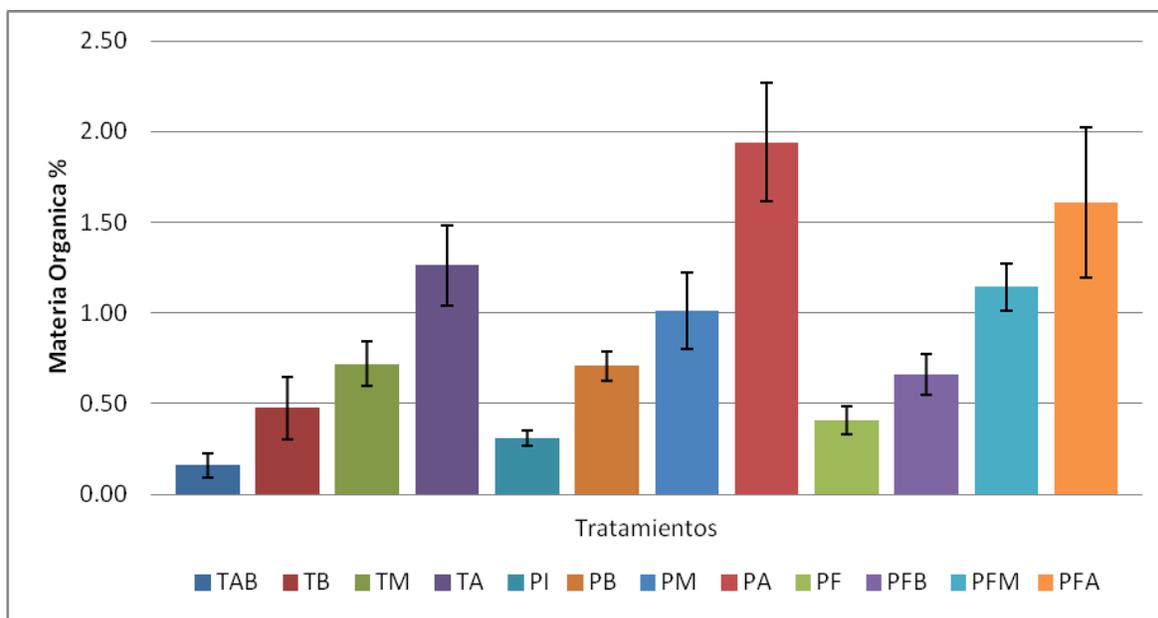


Figura 3. Contenido porcentual de materia orgánica. Se grafican medias de n=4. Las líneas de variabilidad representan desviación estándar. Donde: TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

Es notoria la influencia del estiércol sobre el contenido de materia orgánica en el material. El aporte de esta enmienda tiene un efecto indirecto, ya que influye favorablemente sobre las comunidades microbianas y en el desarrollo radical (Avilés, 2013).

A pesar de que no se adicionó ninguna enmienda al testigo absoluto (TAB), registró un porcentaje mayor en su contenido de materia orgánica comparándolo con lo reportado para estos materiales sin alterar. Esto sucede en trabajos como Avilés (2013) y Velázquez (2002), donde encuentran valores de 0.19 y 1.0% en muestras sin alterar. Dichos autores relacionan lo anterior con la existencia de poblaciones microbianas favorecidas por la roturación del tepetate, la aireación en espacios vacíos y la entrada de agua.

El tepetate se clasifica de acuerdo a su contenido de materia orgánica como; extremadamente pobre en aquellos tratamientos con menos del 0.6 %, pobre (0.6 a 1.2%), moderadamente pobre (1.21 a 1.8 %), hasta medio, que corresponde solamente al tratamiento con planta y dosis alta de estiércol (Vázquez, 1997).

De acuerdo con la clasificación de materia orgánica en suelos derivados de cenizas volcánicas, el tepetate se encuentra en el nivel muy pobre que corresponde a menos de 2% (Fassbender y Bornemisza, 1987).

9.1.3. Capacidad de Intercambio catiónico (CIC)

Se puede apreciar en la tabla 9 que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) varió de 22.54 a 27.24 $\text{Cmol}^+\text{kg}^{-1}$ sin presentar diferencias significativas entre tratamientos. De acuerdo con USDA (1996) valores superiores a 25 $\text{Cmol}^+\text{kg}^{-1}$ indican una fertilidad potencial alta.

Tabla 9. Capacidad de intercambio catiónico

Tratamiento	CIC	Tratamiento	CIC	Tratamiento	CIC
TAB	27.24 ± 1.11 a	P	25.18 ± 1.38 a	PF	22.54 ± 0.79 a
TB	24.57 ± 0.72 a	PB	23.33 ± 0.98 a	PFB	24.05 ± 0.88 a
TM	22.62 ± 1.16 a	PM	26.04 ± 1.65 a	PFM	25.56 ± 1.31 a
TA	23.19 ± 2.02 a	PA	25.11 ± 1.04 a	PFA	23.98 ± 0.72 a

Valores con letras diferentes son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=4$; con su desviación estándar. Donde: TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

Los resultados obtenidos en este trabajo concuerdan con los presentados en otros estudios (Díaz, 2001; Velázquez, 2002; Izquierdo, 2004; Flores *et al.*, 2011; Atilano, 2014) donde han reportado valores de CIC desde 19.4 hasta 28.51 en materiales sin alterar y de la misma zona.

Aun cuando los tratamientos no presentan diferencias estadísticamente significativas la tabla 9 muestra que todos los tratamientos presentan un decremento en el valor de CIC respecto al testigo (TAB). En los resultados presentados por García *et al.* (2008) sucede lo mismo, hay un decremento de los valores de la CIC respecto al testigo. Atilano (2014) explica la variación de los valores de CIC entre tratamientos por la heterogeneidad del material, como la diferencia de cantidades y tipos de arcillas presentes en el material.

Estos resultados son similares a los presentados por Flores *et al.* (2011) y por García *et al.* (2008), donde tampoco se observan diferencias entre tratamientos. Es comprensible no observar cambios en los valores de la CIC, tomando en cuenta que el tepetate está constituido por un elevado contenido de amorfos (alófanos, sílice y vidrio volcánico), éstos, poseen una elevada superficie específica para la adsorción de iones, por lo que contribuyen a incrementar la CIC (Acevedo *et al.*, 2002).

Tomando en cuenta que la CIC de un material está determinada por la cantidad y clase de arcillas, así como del contenido de humus (Buckman & Brady, 1985); en este caso, para apreciar cambios en este parámetro, solo se lograría con el aumento significativo de MO y la mineralización de la misma. Lo anterior requiere de un largo periodo de tiempo. Por lo tanto, en este experimento es de esperarse que los valores de CIC permanezcan sin cambios y sin efecto de tratamientos.

Se ha observado en otros estudios García y colaboradores (2007), que el tiempo es un factor importante que influye en este parámetro ya que favorece la alteración del tepetate lo que libera una alta cantidad de amorfos de sílice, que a su vez aumentan la CIC.

En estudios similares en donde se ha trabajado con material de la misma zona (Avilés, 2013; Atilano 2014; García *et al.*, 2007), si han encontrado diferencias entre tratamientos. Los valores más altos corresponden a aquellos tratamientos donde fue adicionada materia orgánica. Esto coincide con lo mencionado por Pajares *et al.* (2010), la adición de estiércol aumenta la CIC en tepetates en su habilitación.

9.1.4. Porcentaje de saturación de bases

En todos los tratamientos el porcentaje de saturación de bases es del 100%, excepto en (TAB) y (P), que fue de 85.4 y 98.5% respectivamente (Tabla 10). En general, todos los tratamientos muestran valores altos de bases, lo que comúnmente es favorable para el desarrollo de especies vegetales (Velázquez, 2002). Sin embargo, en los tratamientos donde los porcentajes de contenido de sodio son altos, se ve demeritada esta característica.

En primera instancia, el alto porcentaje de bases se debe a los elevados contenidos de cationes intercambiables que saturan la superficie de intercambio catiónico provenientes principalmente de los aportes y acumulación de bases generado por los tratamientos.

Tabla 10. Porcentaje de saturación de bases

Tratamientos	% S.B.	Tratamientos	% S.B.	Tratamientos	% S.B.
TAB	85.4	P	98.5	PF	100
TB	100	PB	100	PFB	100

TM	100	PM	100	PFM	100
TA	100	PA	100	PFA	100

TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

9.1.5. Concentración de cationes intercambiables

En la tabla 11 se observan los resultados de las determinaciones para calcio, magnesio, potasio y sodio, expresados en ($\text{Cmol}^+ \text{kg}^{-1}$).

Concentración de calcio

En el caso del calcio se presentan diferencias estadísticas significativas entre algunos tratamientos, por ejemplo: PFA (planta con fertilizante y dosis alta de estiércol) y PB (planta con dosis baja de estiércol) presentan los valores más bajos 7.21 y $7.18 \text{ Cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ respectivamente. Estos tratamientos son diferentes estadísticamente respecto a los tratamientos PM y PA (planta con dosis media y dosis alta de estiércol), los cuales corresponden a los valores más altos 10.3 y $10.59 \text{ Cmol}^+ \text{kg}^{-1}$. En general se aprecia que no existe una influencia por parte de las enmiendas en la concentración de calcio intercambiable.

Tabla 11. Concentración de calcio intercambiable

Tratamiento	Ca (cmol kg^{-1})	Tratamiento	Ca (cmol kg^{-1})	Tratamiento	Ca (cmol kg^{-1})
TAB	8.57 ± 1.34 ab	P	8.24 ± 0.58 ab	PF	8.39 ± 0.68 ab
TB	8.48 ± 0.56 ab	PB	7.18 ± 1.16 b	PFB	8.39 ± 0.95 ab
TM	8.53 ± 1.95 ab	PM	10.31 ± 1.56 a	PFM	9.65 ± 1.01 ab
TA	8.60 ± 1.32 ab	PA	10.59 ± 0.64 a	PFA	7.21 ± 0.48 b

Valores con letras diferentes son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=4$; con su desviación estándar. Donde: TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

Los valores reportados para calcio intercambiable, en tepetates no alterados que se localizan en la misma zona en que este tepetate fue colectado, varían de 7.65 a 12.0 (Velázquez 2002; García *et al.*, 2008; Flores *et al.*, 2011; Avilés 2013; Atilano 2014). Los resultados obtenidos para calcio en este trabajo, se encuentran dentro de este rango, aun cuando fueron aplicadas diferentes enmiendas.

Concentración de magnesio Cmol^+kg^-

En la tabla 12 se muestran los valores encontrados para el magnesio intercambiable. En general se atribuyen los niveles de magnesio presentes en el tepetate, a la alteración de minerales ferromagnesianos.

Como se observa en la tabla 12 no se presentan diferencias estadísticamente significativas, salvo TA (testigo con dosis alta de estiércol) respecto a PA (planta con dosis alta de estiércol) el cual corresponde al valor más bajo.

Tabla 12. Concentración de magnesio intercambiable

Tratamiento	Mg ($\text{cmol}^+\text{kg}^{-1}$)	Tratamiento	Mg ($\text{cmol}^+\text{kg}^{-1}$)	Tratamiento	Mg ($\text{cmol}^+\text{kg}^{-1}$)
TAB	10.65 ± 1.16 ab	P	11.34 ± 3.40 ab	PF	9.92 ± 0.47 ab
TB	12.46 ± 2.33 ab	PB	10.73 ± 1.36 ab	PFB	10.11 ± 0.91 ab
TM	11.49 ± 1.82 ab	PM	9.39 ± 2.09 ab	PFM	9.45 ± 0.69 ab
TA	12.73 ± 2.00 a	PA	8.26 ± 0.75 b	PFA	10.99 ± 0.19 ab

Valores con letras diferentes son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=4$; con su desviación estándar. Donde: TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

Se observa, además, que los tratamientos con planta presentan una disminución (no significativa) de magnesio respecto a los tratamientos sin planta, esto probablemente se deba a que el cultivo extrae dichos cationes para su nutrición.

Los resultados obtenidos en esta determinación concuerdan con los obtenidos en otros estudios con material de la misma zona, donde se han obtenido valores entre 4.25 hasta 12.62 (Velázquez, 2002; García *et al.*, 2008; Flores *et al.*, 2011; Avilés, 2013; Atilano, 2014).

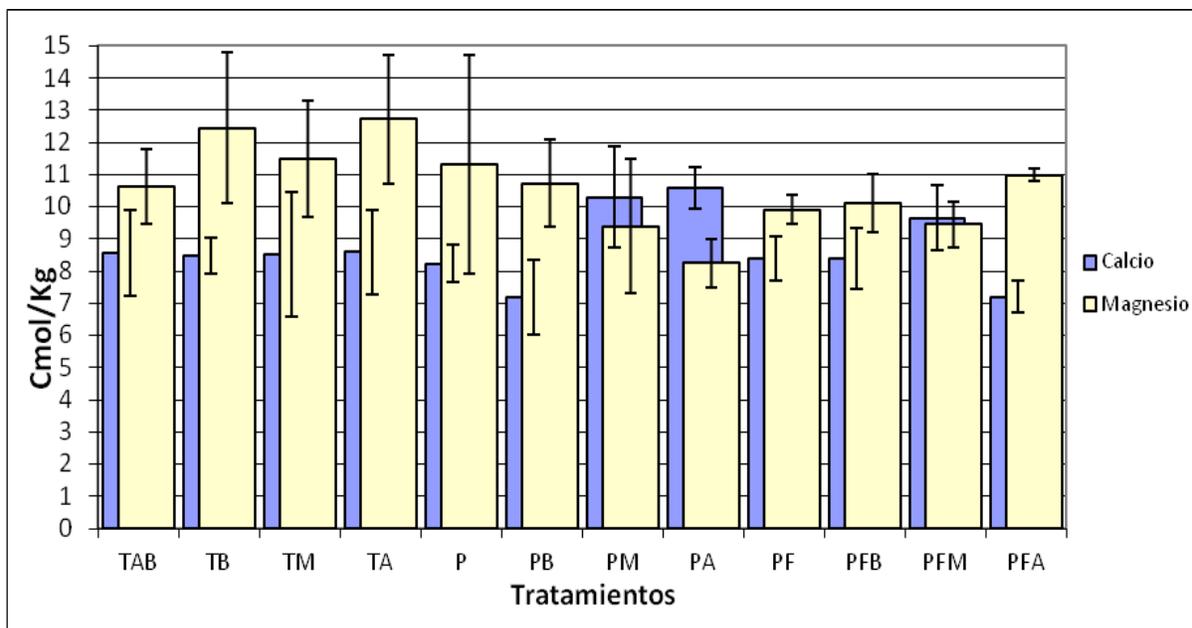


Figura 4. Bases intercambiables (Ca^{2+} y Mg^{2+}). Se Grafican medias de $n=4$. Las líneas de variabilidad representan la desviación estándar. Donde: TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

La figura 4 ilustra claramente, que la concentración de magnesio supera a la de calcio en casi todos los tratamientos. Se sabe que las cantidades elevadas de Mg^{2+} pueden reducir la absorción de Ca^{2+} en los vegetales (Bohn, 1993).

Concentración de potasio Cmol^+kg^-

La tabla 13 presenta los valores de concentración de potasio obtenidos en los diferentes tratamientos. El análisis estadístico muestra la existencia de diferencias significativas. Sin embargo, con frecuencia las diferencias estadísticas, salvo en el caso del sodio, suelen no afectar notablemente la fisiología y crecimiento vegetal/cultivos.

En la tabla 13 destaca el hecho de que el testigo absoluto presenta valores por debajo de todos los tratamientos y es estadísticamente semejante a aquellos tratamientos sin estiércol y con dosis baja de estiércol (exceptuando TB).

Tabla 13. Concentración de potasio intercambiable

Tratamiento	K ($\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$)	Tratamiento	K ($\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$)	Tratamiento	K ($\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$)
TAB	1.76 ± 0.14 d	P	1.97 ± 0.21 dg	PF	1.69 ± 0.14 d
TB	2.52 ± 0.09 bcg	PB	2.15 ± 0.16	PFB	1.90 ± 0.16 d

			cdg		
TM	3.22 ± 0.19 a	PM	2.45 ± 0.18 abc	PFM	2.69 ± 0.22 abc
TA	3.94 ± 0.12 f	PA	3.13 ± 0.28 a	PFA	2.88 ± 0.23 ab

Valores con letras diferentes son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=4$; con su desviación estándar. Donde: TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

Los valores más bajos en el contenido de potasio intercambiable en los tratamientos, corresponden a aquellos que no contienen estiércol (TAB, P y PF) y por el contrario los valores más altos los presentan los que contienen dosis altas de estiércol. Esto muestra la influencia que tiene el estiércol en el aporte de bases, especialmente de potasio.

Por otra parte se aprecia como los tratamientos sin planta, presentan valores más altos que aquellos que si contienen planta; esto probablemente se deba a la extracción del potasio por parte de la planta.

Concentración de sodio $\text{Cmol}^+ \text{kg}^-$

En la tabla 14 se muestran los porcentajes obtenidos para la concentración de sodio contenido en los diferentes tratamientos. Se observan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos

Tabla 14. Concentración de sodio intercambiable

Tratamiento	Na ($\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$)	Tratamiento	Na ($\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$)	Tratamiento	Na ($\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$)
TAB	2.30 ± 0.33 g	P	3.26 ± 0.51 bcdf	PF	3.27 ± 0.54 cdfg
TB	2.91 ± 0.28 fg	PB	4.13 ± 0.33 abcd	PFB	4.35 ± 0.45 abc
TM	3.22 ± 0.13 dfg	PM	4.50 ± 0.46 ab	PFM	4.24 ± 0.32 abc
TA	3.97 ± 0.38 abcdf	PA	4.69 ± 0.32 a	PFA	4.78 ± 0.29 ab

Valores con letras diferentes son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=4$; con su desviación estándar. Donde: TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

La tabla 14 indica claramente que los tratamientos TA; PB; PM; PA; PFB; PFM y PFA, presentan porcentajes elevados de sodio. El común de todos estos tratamientos con fase

sódica, es la presencia de estiércol en dosis variables. En contraste, los valores más bajos en el contenido de sodio lo presentan los tratamientos que no contienen estiércol (TAB, P, y PF).

Como se muestra en la figura 5 y tabla 14, los resultados obtenidos de Na^+ intercambiable, son elevados en varios de los tratamientos, con valores que exceden 3.97 a 4.78 Cmol Kg^{-1} . En la tabla 15 se presenta el porcentaje de sodio intercambiable en todos los tratamientos, encontrando que todos los tratamientos con estiércol exceden el 15%, excepto TB. Es importante mencionar que cuando el catión sodio contribuye con un porcentaje igual o superior al 15% de la CIC, se considera que los materiales, incluyendo suelos y tepetates, son sódicos (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Tabla 15. Porcentaje de sodio intercambiable (PSI)

Tratamiento	PSI (%)	Tratamiento	PSI (%)	Tratamiento	PSI (%)
TAB	8.44	P	12.95	PF	14.51
TB	11.84	PB	17.70	PFB	18.09
TM	14.24	PM	17.28	PFM	16.59
TA	17.12	PA	18.68	PFA	19.93

Se muestra el porcentaje de sodio intercambiable (PSI). Se obtuvo multiplicando el Na^+ por 100 entre la CIC. Donde: TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

Se sabe que los altos niveles de Na causan una dispersión de agregados en el suelo, dañando la estructura, como resultado; la aeración y la conducción del agua empeoran. Los efectos sobre la planta son desfavorables en el crecimiento y desarrollo, particularmente en etapas tempranas de crecimiento de la plántula. (Fassbender y Bornemisza 1987).

Flores y colaboradores (2011), atribuyen el aumento de Na al intemperismo de feldespatos sódicos y al efecto de la planta en dicho intemperismo. Sin embargo, la Figura 5 muestra claramente como el estiércol aumenta proporcionalmente la concentración de sodio y también la de potasio en el material. Conforme aumenta la dosis de estiércol, aumentan los valores de dichos cationes.

En general, la adición de estiércol resultó ser un aporte significativo de bases intercambiables. En el anexo II se muestra la cantidad de nutrientes que aporta el estiércol bovino, hasta cuatro años después de ser aplicado.

En todos los tratamientos donde se aumenta la dosis de esta enmienda se registra un incremento en las bases, excluyendo el calcio, ya que este no mostró esta tendencia ni diferencias significativas.

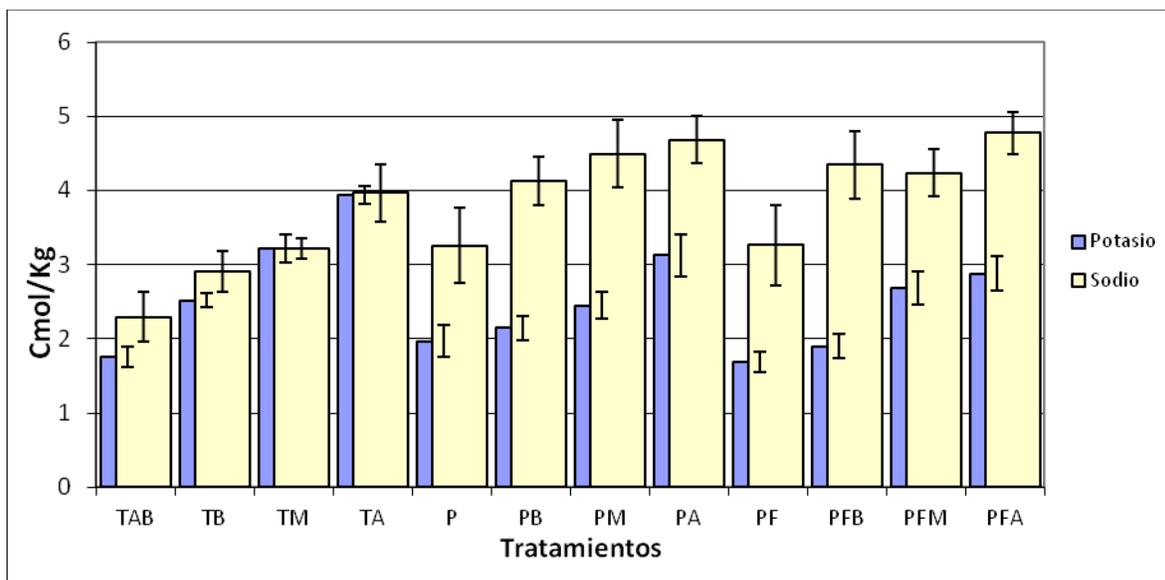


Figura 5. Bases intercambiables (K^+ y Na^+). Se Grafican medias de $n=4$. Las líneas de variabilidad representan la desviación estándar. Donde: TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

Si bien se sabe el efecto que tiene el estiércol sobre el incremento de bases intercambiables, no se descarta la idea de que la alteración del tepetate también aporta bases al medio. Así, el tepetate, rico en feldspatos libera cationes al intemperizarse, mismos que se van acumulando debido a que el material está confinado en una maceta que carece de drenaje.

Las plantas tienen un efecto sobre el intemperismo del tepetate, al absorber los nutrimentos se crea una deficiencia en la concentración de iones, esto provoca que los elementos contenidos en el material se difundan a la solución del suelo permitiendo que se liberen iones que se encuentran en su composición (Flores *et al.*, 2011).

9.1.6. Contenido porcentual de cationes intercambiables.

La tabla 16 muestra el contenido porcentual de los cuatro cationes intercambiables determinados en cada tratamiento.

Tabla 16. Contenido porcentual de cationes intercambiables en el tepetate

Tratamientos	% Ca	%Mg	%K	%Na
TAB	31.5	39.1	6.5	8.4
TB	34.5	50.7	10.3	11.8
TM	37.7	50.8	14.2	14.2
TA	37.1	54.9	17.0	17.1
P	32.7	45.0	7.8	12.9
PB	30.8	46.0	9.2	17.7
PM	39.6	36.1	9.4	17.3
PA	42.2	32.9	12.5	18.7
PF	37.2	44.0	7.5	14.5
PFB	34.9	42.0	7.9	18.1
PFM	37.8	37.0	10.5	16.6
PFA	30.1	45.8	12.0	19.9

TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol

Como fue mencionado, la saturación de bases es alta en este tepetate (Tabla 10). Sin embargo, de acuerdo con Vázquez (1997) los porcentajes presentes de cada catión en este material, son fisiológicamente inadecuados e incluso restrictivos para muchos cultivos.

Así comparando los resultados obtenidos con los propuestos en la tabla 17 la cual fue elaborada por Vázquez (1997), se observa que ninguno de los cationes muestra porcentajes que se encuentren en el rango adecuado.

Por ejemplo, el porcentaje de calcio intercambiable se estima muy por debajo de los valores propuestos por Vázquez (1997). Los valores reportados de los análisis efectuados, presentan valores porcentuales que oscilan de 30.1 a 42.2 %, casi 30% menos de lo estipulado por dicho autor (vg. 65 -80%, Tabla 17).

El porcentaje del magnesio, por el contrario, se encuentra con valores hasta de 30% por encima de lo deseable. Sucede lo mismo con el porcentaje de potasio intercambiable, los valores rebasan el rango adecuado, excepto por los tratamientos TAB, P y PF que son aquéllos que no contienen estiércol. Finalmente el sodio intercambiable presenta un alto porcentaje en todos los tratamientos con valores entre 8.4 a 19.9%. Se observó que en aquellos tratamientos sin estiércol (TAB, P y PFA) se presentan los porcentajes más bajos y que conforme aumenta la dosis de estiércol, se incrementa el contenido de sodio.

Tabla 17. Rango adecuado de cationes intercambiables (Vázquez, 1997).

Rango deseables de cationes intercambiables	
Catión	Rango
Calcio	65%-80%
Magnesio	10%-20%
Potasio	3%-8%
Sodio	<6%

9.1.7. Relación $\text{Ca}^+:\text{Mg}^{++}$

Esta relación es utilizada comúnmente cuando se pretende evaluar el índice de calidad de suelo y su salud.

Así, los valores obtenidos de esta relación, son utilizados principalmente para estimar los grados de sinergismos o antagonismos, entre los elementos Ca y Mg los cuales afectan su propia disponibilidad y la del fósforo. Además se utiliza para estimar procesos de agregación, formación de la estructura, erodabilidad, cementación secundaria y hábito microbiano entre otros.

En la tabla 18 se aprecia, con base en Landon (1984), que con excepción de los tratamientos PM; PA y PFM, todos los demás tratamientos presentan valores que demuestran la no disponibilidad de Ca por los cultivos. Con respecto a los tratamientos PM; PA y PFM presentan los valores con el límite aceptable más bajo para la disponibilidad de Ca.

Tabla 18. Relación calcio:magnesio en los tratamientos

Tratamientos	Ca:Mg	Tratamientos	Ca:Mg	Tratamientos	Ca:Mg
TAB	0.8±0.2	P	0.7±0	PF	0.8±0
TB	0.7±0.	PB	0.7±0	PFB	0.8±0
TM	0.8±0.	PM	1.1±0.	PFM	1.0±0
TA	0.7±0	PA	1.3±0	PFA	0.7±0

TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta

con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

9.1.8. Conductividad eléctrica

La tabla 19 muestra los valores obtenidos en la determinación de conductividad eléctrica. Se observan diferencias estadísticamente significativas entre algunos tratamientos. Al respecto es importante mencionar que con frecuencia, algunas diferencias estadísticamente significativas, no influyen en el significado agronómico práctico, ni en el manejo.

Por otra parte, los valores más bajos y estadísticamente iguales corresponden al testigo absoluto con 1.63 dSm^{-1} y a los tratamientos que cuentan con la presencia del sorgo exceptuando PFA (planta con fertilizante y dosis alta de estiércol), cuyos valores fluctúan de 1.54 a 2.58 dSm^{-1} (Tabla 19).

Por otra parte, el valor más alto corresponde al tratamiento TA (testigo con dosis alta de estiércol) con 4.55 dSm^{-1} , el cual presenta diferencias significativas respecto a todos los tratamientos.

Tabla 19. Valores de conductividad eléctrica

Tratamiento	CE (dSm^{-1})	Tratamiento	CE (dSm^{-1})	Tratamiento	CE (dSm^{-1})
TAB	$1.63 \pm 0.27\text{b}$	P	$1.54 \pm 0.21\text{b}$	PF	$2.18 \pm 0.51\text{ab}$
TB	$3.05 \pm 0.95\text{cd}$	PB	$2.04 \pm 0.50\text{ab}$	PFB	$2.38 \pm 0.07\text{abcd}$
TM	$3.37 \pm 0.11\text{c}$	PM	$2.24 \pm 0.35\text{abd}$	PFM	$2.58 \pm 0.18\text{abcd}$
TA	$4.55 \pm 0.78\text{f}$	PA	$2.22 \pm 0.54\text{abcd}$	PFA	$2.85 \pm 0.30\text{acd}$

Valores con letras diferentes son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=4$; con su desviación estándar. Donde: TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

En resumen, en dicha tabla se observa lo siguiente con base en USDA, 1996.

a. Las muestras de los tratamientos TAB; P; PB y PF, presentan una conductividad eléctrica $< 2.0 \text{ dSm}^{-1}$, lo que las ubica como muestras no salinas y con un efecto casi nulo sobre la fisiología de las plantas.

b. Las muestras de los tratamientos TB; TM; PM; PA; PFB; PFM y PFA se caracterizan por clasificar de acuerdo a su conductividad eléctrica de $2.0 - <4.0 \text{ dSm}^{-1}$, como ligeramente salinas. Este nivel de salinidad solo afecta los rendimientos de los cultivos más sensibles.

c. Finalmente, la muestra del tratamiento TA, se caracteriza por presentar un valor de conductividad eléctrica de 4.5 dSm^{-1} . Este valor se considera moderadamente salino y tiene un significado agronómico que advierte que dicho valor reduce el rendimiento en diferentes especies vegetales.

Es notorio que los problemas de conductividad eléctrica (salinidad) están claramente relacionados con la aplicación de estiércol en los tratamientos y como ha sido mencionado, la presencia de un drenaje nulo (Figura 6). De acuerdo con Salazar *et al.* (2010) la aplicación de estiércol en dosis altas puede incrementar la salinidad del suelo. Estudios han evaluado dosis de estiércol bovino de 0 a 160 Mg ha^{-1} en cultivos, observando que las dosis mayores a 120 Mg ha^{-1} incrementaron la conductividad eléctrica (CE) del suelo a 4.9 dS m^{-1} , comparado con 2.58 dS m^{-1} en el testigo.

En la figura 6 se aprecia claramente que los valores de CE tienden a incrementarse en proporción directa con el incremento de la dosis de estiércol.

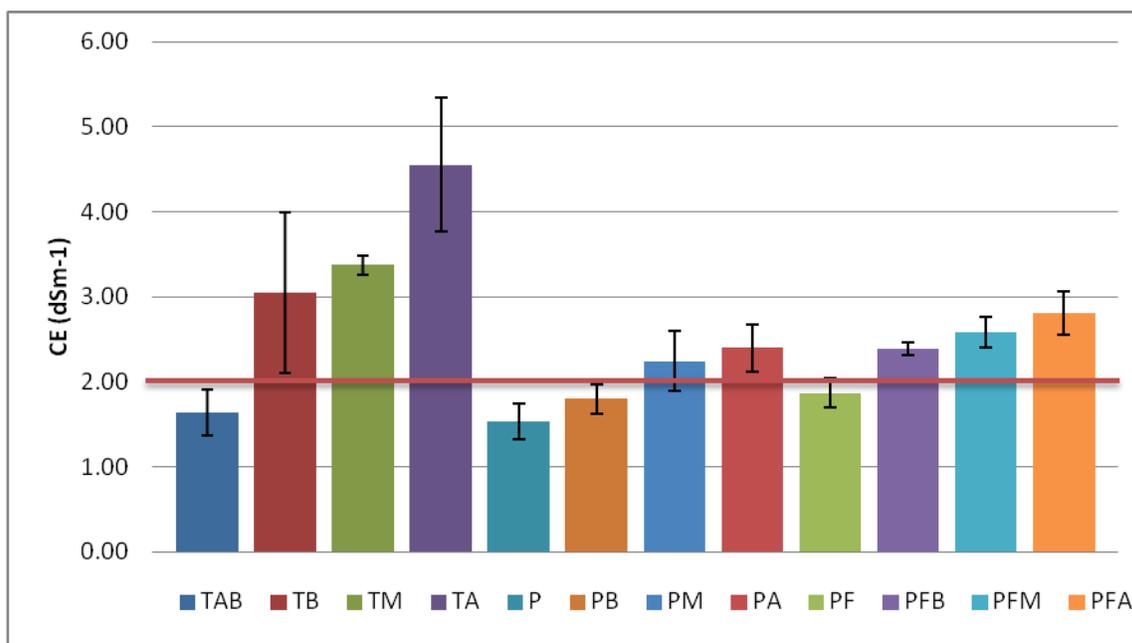


Figura 6. Promedio de la conductividad eléctrica. Se grafican medias de $n=4$. Las líneas de variabilidad representan la desviación estándar. Donde: TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

En general las muestras obtenidas de los tratamientos, muestran niveles adecuados en la conductividad eléctrica con valores por debajo de 4.0 dSm^{-1} . La única muestra que presenta problema por el tratamiento es TA (testigo con dosis alta de estiércol) con 4.55 dSm^{-1} , por lo cual podría ser clasificada como una muestra salina (Siebe *et al.*, 1999).

González (2013), menciona algunas propuestas para la rehabilitación de suelos con valores altos en CE, las cuales consisten en el lavado del suelo para disolver y transportar sales solubles, de esta manera disminuye el contenido de sales y se obtienen valores menores en la CE, otra recomendación es el cultivo de especies tolerantes a la salinidad como la remolacha, alfalfa y algodón.

9.2. Análisis de las características físicas del tepetate

9.2.1. Clases de tamaño de partícula (terrones)

La tabla 20 muestra los resultados de la evaluación realizada para las clases de tamaño de partícula. Los valores representan el porcentaje promedio del diámetro de los terrones en las cuatro repeticiones de cada tratamiento con su respectiva desviación estándar.

De acuerdo con la prueba de Tukey, no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. Salvo en la fracción de 10 a 5 mm, en el tratamiento TB (testigo con dosis baja de estiércol) respecto a PF (planta con fertilizante), que corresponde al valor más alto. Sin embargo, se estima que la diferencia entre estos resultados solo tiene como causa, la presencia de diferentes facies físicas, mecánicas y mineralógicas que caracterizan al tepetate (vg. diferentes grados de cementación y/o compactación).

Tabla 20. Porcentaje promedio del diámetro de partículas

Tratamientos	> 10 mm	10 - 5 mm	5 - 2 mm	2 - 1 mm	1 - 0.25 mm	< .25 mm
TAB	1.78 ± 0.80 a	31.80 ± 13.11 ab	27.31 ± 11.86 a	10.74 ± 6.96 a	15.81 ± 3.45 a	11.98 ± 6.21 a
TB	1.08 ± 3.01 a	28.02 ± 5.66 b	25.77 ± 11.68 a	13.00 ± 8.66 a	18.74 ± 11.17 a	15.60 ± 4.88 a
TM	1.56 ± 1.13 a	38.09 ± 6.86 ab	28.91 ± 11.90 a	10.77 ± 8.13 a	14.47 ± 2.66 a	11.24 ± 8.43 a
TA	1.91 ± 6.05 a	42.37 ± 9.20 a	27.58 ± 12.65 a	08.94 ± 7.23 a	9.59 ± 0.92 a	7.01 ± 3.51 a
P	1.42 ± 1.88 a	27.73 ± 2.89 ab	27.34 ± 1.88 a	11.97 ± 11.14 a	15.99 ± 6.27 a	15.55 ± 17.34 a
PB	2.85 ± 2.81 a	39.79 ± 5.20 ab	26.55 ± 12.30 a	9.13 ± 1.59 a	12.58 ± 4.70 a	11.68 ± 3.45 a
PM	2.37 ± 6.66 a	37.66 ± 13.63 ab	28.63 ± 3.35 a	9.53 ± 5.41 a	10.67 ± 0.98 a	8.69 ± 10.29 a
PA	2.14 ± 1.93 a	37.61 ± 12.71 ab	27.52 ± 8.46 a	10.25 ± 6.77 a	13.57 ± 10.05 a	11.12 ± 11.66 a
PF	1.39 ± 6.61 a	30.85 ± 7.19 a	25.94 ± 9.66 a	11.06 ± 9.38 a	14.33 ± 8.54 a	11.81 ± 10.38 a
PFB	1.74 ± 3.24 a	26.94 ± 19.70 ab	27.31 ± 11.80 a	11.50 ± 9.88 a	18.53 ± 2.17 a	10.12 ± 5.28 a
PFM	1.37 ± 4.47 a	36.041 ± 0.73 ab	30.40 ± 6.67 a	10.22 ± 0.46 a	12.41 ± 9.45 a	9.89 ± 2.39 a

PFA	2.99 ± 8.90 a	42.88 ± 53.57 ab	25.41 ± 5.50 a	7.83 ± 12.60 a	13.77 ± 16.14 a	10.10 ± 1.47 a
-----	---------------	------------------	----------------	----------------	-----------------	----------------

Valores con letras diferentes son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=4$; con su respectiva desviación estándar y donde: TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

Se observa que la fracción de 10 a 5 mm (alrededor de 33%) es la que predomina en todos los tratamientos; seguida de la fracción de 5 a 2 mm (cerca de 27%). Los valores anteriores coinciden con otros estudios similares donde evalúan este parámetro. Entre dichos estudios están los de Acevedo *et al.* (2001); García *et al.* (2008); Flores *et al.* (2011) y Atilano (2014). Esto lo atribuyen a que al inicio del experimento se roturó el material, utilizando únicamente las fracciones comprendidas entre los 2 mm y 10 mm de diámetro.

Sin embargo, se estima que aunque no se observaron diferencias entre tratamientos, con respecto al tamaño de partículas, no prueba que las enmiendas no tuvieron ninguna influencia. En el momento que se sustrajo (al finalizar el experimento) la raíz en aquellos tratamientos con planta y estiércol, se logró observar la presencia muy escasa y pobremente desarrollada de estructuras en el tepetate similares a “agregados”, las cuales estaban unidas por pequeñas raíces muy inestables, colapsando al término de la actividad.

Velázquez (2002), considera que cuando se introducen especies vegetales en un sustrato, constituido por tepetate roturado, la raíz al desarrollarse, va agrupando mecánicamente los fragmentos. Éste proceso solo se lleva a cabo mientras la raíz está presente, por lo que su efecto sobre la agrupación de partículas es transitorio y la estructura desaparece al morir o extraer la raíz (agregación muy estable).

9.2.2. Estabilidad de partículas (terrones) en húmedo

La tabla 21 muestra los resultados de la evaluación de estabilidad de tamaño de partículas, los valores son el porcentaje del promedio de las cuatro repeticiones.

Tabla 21. Porcentaje promedio de la estabilidad en húmedo de clases de tamaño de partículas.

Tratamientos	> 5 mm	5 - 3 mm	3 - 2 mm	2 - 1 mm	1 - 0.5 mm	0.5 - 0.25mm	< 0.25 mm
TAB	31.09 ± 5.77 a	5.44 ± 1.43 a	21.33 ± 3.52 a	9.13 ± 2.99 a	8.43 ± 3.72 a	3.00 ± 1.92 a	19.02 ± 4.23ab
TB	29.81 ± 5.95 a	5.84 ± 1.68 a	22.25 ± 3.05 a	10.34 ± 2.28 a	6.28 ± 5.04 a	3.57 ± 3.81 a	18.78 ± 2.05 ab
TM	33.24 ± 4.09 a	5.63 ± 1.73 a	21.04 ± 2.03 a	9.04 ± 2.93 a	7.27 ± 4.63 a	3.86 ± 3.49 a	18.34 ± 3.65ab
TA	29.61 ± 7.64 a	6.86 ± 1.50 a	18.23 ± 3.79 a	8.27 ± 6.63 a	5.55 ± 7.53 a	3.06 ± 6.09 a	13.18 ± 8.17b
P	29.12 ± 7.30 a	5.98 ± 2.06 a	24.51 ± 4.90 a	9.97 ± 0.50 a	7.95 ± 2.67 a	3.17 ± 3.52 a	16.55 ± 7.95ab

PB	36.96 ± 7.25 a	6.01 ± 1.71 a	21.98 ± 3.19 a	9.24 ± 2.17 a	7.61 ± 3.48 a	3.82 ± 2.55 a	17.10 ± 3.28ab
PM	32.25 ± 8.45 a	6.19 ± 1.83 a	22.16 ± 5.24 a	9.69 ± 2.90 a	7.69 ± 3.56 a	3.57 ± 2.40 a	16.28 ± 2.57ab
PA	35.06 ± 4.36 a	5.88 ± 1.85 a	21.44 ± 3.93 a	8.78 ± 2.38 a	7.63 ± 1.67 a	3.66 ± 3.35 a	14.91 ± 3.30ab
PF	26.49 ± 6.48 a	5.44 ± 2.67 a	20.03 ± 1.07 a	11.41 ± 1.85 a	9.31 ± 1.23 a	3.98 ± 1.99 a	19.82 ± 2.52 a
PFB	33.54 ± 6.80 a	5.27 ± 1.70 a	21.24 ± 3.03 a	8.70 ± 2.64 a	7.87 ± 2.04 a	4.26 ± 2.57 a	18.24 ± 1.79ab
PFM	30.21 ± 8.74 a	5.41 ± 1.66 a	22.56 ± 3.03 a	9.97 ± 4.59 a	8.14 ± 4.23 a	3.99 ± 3.13 a	17.06 ± 4.13ab
PFA	32.32 ± 6.15 a	5.49 ± 1.28 a	20.29 ± 2.39 a	9.04 ± 4.45 a	7.63 ± 5.11 a	3.73 ± 2.19 a	18.52 ± 4.67ab

Valores con letras diferentes son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=4$; con su respectiva desviación estándar. Donde: TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

En la tabla 21 se muestra que en general no se obtuvieron diferencias significativas entre tratamientos. Los únicos tratamientos que presentaron una diferencia fueron, el testigo con dosis alta de estiércol (TA) y planta con fertilizante (PF) en la fracción menor a 0.25 mm. Similar al caso del diámetro de partícula (Tabla 20), se considera que estos resultados no son producto de los tratamientos.

Se observa en la tabla 21 que la fracción predominante es la > 5.0 mm seguida de la fracción 3 a 2 mm. Lo obtenido concuerda con lo obtenido por García *et al.* (2008); Avilés (2013) y Atilano (2014) en otros estudios. Sin embargo, es probable que estas aparentes coincidencias, solo sean producto del comportamiento mecánico del tepetate.

Finalmente, no se obtuvieron resultados favorables, ni se observó efecto de los tratamientos sobre la agregación y la estabilidad de agregados. Esto se puede explicar en función de las inadecuadas concentraciones de cationes intercambiables en el material (Figura 4 y 5). El alto contenido de sodio en el complejo coloidal provoca dispersión de las partículas, por lo tanto impide la agregación. Por otra parte, el calcio que es un agente importante en la formación de agregados, se encuentra en bajas concentraciones.

9.2.3. Color

Los resultados obtenidos, muestran que los colores del tepetate determinados en húmedo (10YR4/4 pardo amarillento) y en seco (10YR7/6 amarillo), permanecen sin cambio, con respecto al testigo, en todos los tratamientos realizados.

Se infiere que los colores que caracterizan a este material, reflejan bajos porcentajes de materia orgánica, que de acuerdo con Ávila (2011), sugieren baja fertilidad natural. Al respecto, se sabe que los colores claros, dificultan la absorción de la energía solar, ya que reflejan la mayoría de los rayos solares por efecto albedo. Por lo tanto hay menor absorción de ondas infrarrojas y no llegan a alcanzar una mayor temperatura como lo haría un material oscuro.

Esto se relaciona con la importancia que tienen las temperaturas en el suelo para el desarrollo de los microorganismos, según sea el grado de susceptibilidad de los mismos (Fassbender y Bornerisza 1987).

9.2.4. Clase textural

Similar a lo que ocurre con los resultados obtenidos para el color, los valores de textura, en todos los tratamientos, no muestran diferencias estadísticamente significativas con respecto al testigo.

Los valores promedio de los apartados texturales que caracterizan al tepetate son: 35% arena; 55% limo y 10% arcilla, cuyo conjunto le confiere un tipo textural denominado Migajón limoso (USDA, 1996).

De acuerdo con Gama *et al.* (2007), este tipo textural, con frecuencia resulta común en materiales volcánicos jóvenes (Holoceno). Sin embargo, el autor advierte que la presencia de pseudolimos o pseudoarenas constituidos como consecuencia de la formación de los complejos órgano-metálicos, interfiere con la determinación confiable de la textura real de estas capas. Así, la dificultad para disgregar estos complejos en el análisis granulométrico convencional, hace que la textura aparezca más gruesa de lo que realmente es. Actualmente, no existe una determinación analítica, incluyendo ultrasonido, completamente confiable para determinar la clase textural de estas capas.

9.2.5. Densidad real

El valor promedio obtenido, en todos los tratamientos y el testigo absoluto, es de 2.4 (g/cm^3), dicho valor, aunque algo bajo, resulta congruente con los minerales presentes en el tepetate como: algunos ferromagnesianos, mezclados con vidrio volcánico y pómez, lo cual es común en materiales volcánicos básicos (Gama *et al.*, 2007).

9.2.6. Densidad aparente

En general los valores de densidad aparente obtenidos de tres repeticiones, resultan muy heterogéneos, no solo entre los tratamientos sino en cada tratamiento. Dichos valores varían de modo caótico, oscilando de 0.1 Mg m^{-3} ; 1.8 Mg m^{-3} hasta 2.3 Mg m^{-3} en una muestra, de modo independiente al tratamiento a que fue sometida dicha muestra.

Los análisis de laboratorio efectuados (Tabla 4 y 5) sugieren que este comportamiento del tepetate se debe a la presencia de facies físicas que muestra el tepetate de modo natural. Se estima que el tepetate estudiado, contiene en su matriz, facies características de duripanes y facies típicas de fragipanes (intergradación genética).

En el primer caso, el duripán es un material cementado, poco poroso, muy duro en seco y firme a extremadamente firme en húmedo, que no se disgrega al ser sumergido en agua. Generalmente, los valores de densidad aparente registrados para tepetates tipo duripán, sin alterar, oscilan entre 1.46 a 2.8 Mg m^{-3} (Acevedo *et al.*, 2003; Prat *et al.*, 2003).

En contraste, el tepetate de tipo fragipán se caracteriza por ser un material consolidado y en ocasiones compactado en diferentes grados. Su dureza oscila de moderada a muy dura. Es característico que los terrones de fragipán siempre se disgregan en agua. De acuerdo con Gama y colaboradores (2007), los valores de densidad aparente registrados para fragipanes, oscilan de 1.0 a 1.3 Mg m⁻³.

9.2.7. Desleimiento

El desleimiento es el porcentaje de estabilidad que presentan los agregados al contacto con el agua, esto ayuda a determinar la penetrabilidad de las raíces y la resistencia a la destrucción de las unidades estructurales y grado de erodabilidad (Siebe *et al.*, 1996).

En general el material mostró, en la fracción >10 mm y en los tratamientos con estiércol y planta la existencia de escasos agregados, de tamaño pequeño, de forma redondeada (Figura 7) y débil estabilidad estructural al ser inmersos en agua. De acuerdo con Siebe *et al.* (1996) se considera que los agregados presentan un porcentaje de estabilidad bajo.



Figura 7. Agregados presentes en la fracción mayor a 10 mm de tratamientos con planta y estiércol. Se observan escasos agregados subredondeados, pobremente desarrollados y muy deleznable tanto en seco como en húmedo.

En la tabla 22 se describen los resultados generales de las características físicas del tepetate.

Tabla 22. Características físicas del tepetate

Color		Clase textural	Densidad real	Densidad aparente	Desleimiento
Húmedo	seco				
(10YR4/4 pardo amarillento)	(10YR7/6 amarillo)	Areno limosa fina	2.4±1.8	1.4±2.1	muy baja

Los valores son promedios de tres repeticiones con su respectiva desviación estándar

9.3. Cuantificación de la biomasa vegetal

La tabla 23 contiene los resultados de biomasa del sorgo, los cuales solo incluyen el peso seco de la planta. Se muestra el promedio de cuatro repeticiones de cada tratamiento con su respectiva desviación estándar. Se observa la existencia de diferencias significativas entre tratamientos en cuanto al peso en seco de la planta.

Tabla 23. Promedio del peso seco de la planta

Tratamiento	1° corte Peso seco (g)	2° corte Peso seco (g)	peso total (g)	Raíz Peso Seco (g)
P	7.6 ± 2.2 cd	1.8 ± 0.2 b	9.37±2.2 d	13.3 ± 4.3 b
PB	15.4 ± 4.4 bcd	2.9 ± 1.1 b	18.27±5.3 cd	25.8 ± 13.0 ab
PM	20.4 ± 4.1 ab	11.4 ± 8.3 ab	31.82±7.0 abc	40.9 ± 17.3 a
PA	17.4 ± 4.0 abc	3.7 ± 1.3 ab	21.07±3.9 bcd	16.2 ± 5.0 b
PF	5.0 ± 0.7 d	1.6±0.4 b	6.54±0.8 d	9.3 ± 2.4 b
PFB	26.1 ± 2.8 a	13.2±2.8 a	39.36±4.2 a	45.4 ± 12.3 a
PFM	25.5 ± 5.7 ab	9.8±2.6 ab	35.27±6.5 ab	24.5 ± 7.5 ab
PFA	18.3 ± 6.3 ab	9.1±5.6 ab	27.38±13.7 abc	15.9 ± 12.1 b

Valores con letra diferente son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores son medias de $n=4$, con su respectiva desviación estándar. Donde P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

Como se observa en la tabla 23 y figura 8; en el primer corte, los tratamientos con mayores pesos registrados corresponden a aquellos que contienen dosis media y dosis alta de estiércol, junto con PFB (planta con fertilizante y dosis baja de estiércol), que resultaron ser semejantes estadísticamente. Para el segundo corte, PFB sigue siendo el mayor peso registrado seguido de PM y PFM, se observa además, que los tratamientos sin estiércol adicionado son semejantes estadísticamente entre sí, junto con PB (Planta dosis baja de estiércol).

Finalmente, en el total de ambos cortes, el tratamiento con mayor producción corresponde nuevamente a PFB, seguido de PFM y PM, siendo estos estadísticamente semejantes. Esto indica que los tratamientos más favorables corresponden a la dosis baja (24 Mg/ha) y media de estiércol (48 Mg/ha) con fertilizante (160 kg de N/ha).

Respecto al peso seco de la raíz, los tratamientos P, PF, PA y PFA resultaron ser semejantes estadísticamente entre sí y diferentes de los obtenidos en PM y PFB, los cuales corresponden a los mayores pesos registrados.

Es notorio que los tratamientos con menor peso registrado en la biomasa del sorgo, corresponden a aquellos que no contienen estiércol adicionado. Debido a que el tepetate tiene un escaso contenido de materia orgánica, las plantas establecidas no contaron con una fuente de nutrimentos y por lo tanto desarrollaron una escasa biomasa vegetal.

Se sabe que en tierras sometidas a cultivo, es importante la adición de estiércol para aumentar la capacidad de retención de humedad y facilitar la disponibilidad de nutrimentos para las plantas (López *et al.*, 2001).

Los mismos autores mencionan que el estiércol incrementa la producción de sorgo, sin embargo dosis muy altas disminuyen el crecimiento y la producción. Reportan que con dosis de estiércol de 22 t ha^{-1} , se obtuvieron altos rendimientos, cuando la dosis se aumentó a 67 y a 134 t ha^{-1} , se redujo significativamente la producción.

Respecto al factor fertilizante tabla 23 y figura 8, se aprecia que los valores de PFB (planta con fertilizante mas dosis baja de estiércol) son mayores y estadísticamente diferentes a PB (planta mas dosis baja de estiércol), esto muestra la influencia que tiene el fertilizante sobre la producción de biomasa en el cultivo. Lo mismo ocurre con los tratamientos con dosis media y alta de estiércol, los pesos obtenidos con los tratamientos con fertilizante son mayores; sin embargo, estos no presentan diferencias estadísticamente significativas.

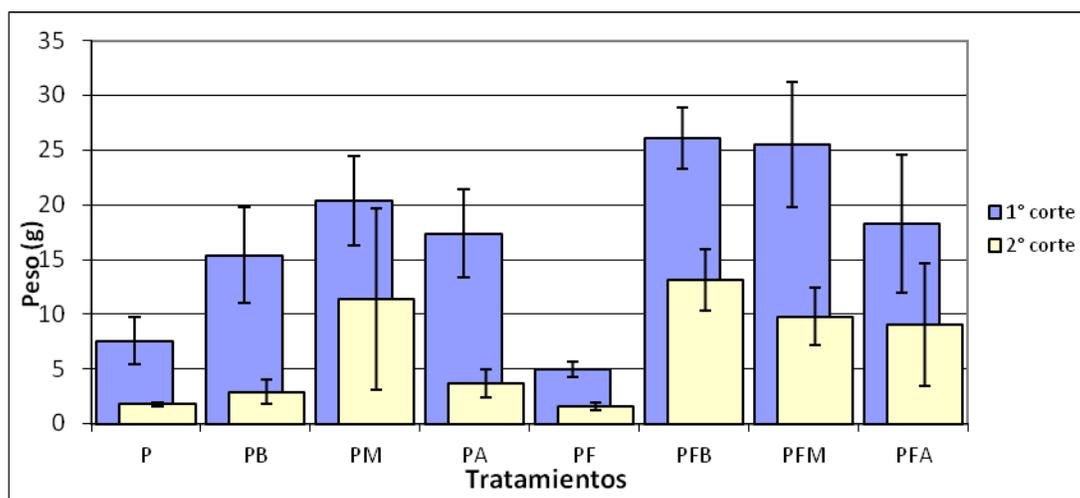


Figura 8. Promedio de la biomasa obtenida en dos cortes. Se grafican medias de $n=4$ del peso seco de la planta (g) y su desviación estándar asociada. Donde: P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

Se podría esperar que los tratamientos con mayor desarrollo de biomasa correspondieran a aquellos con dosis altas de estiércol y fertilizante, sin embargo, no ocurrió así. Lo anterior puede deberse al contenido de nutrimentos en el material y su balance, causando antagonismo entre cationes.

En la tabla 24 se muestran las relaciones entre cationes obtenidas en el material por cada tratamiento.

Tabla 24. Relación entre cationes en el tepetate

Tratamientos	Ca/Mg	Mg/K	Ca + Mg /K	Ca/K
P	0.7	5.8	9.9	4.2
PB	0.7	5.0	8.3	3.3
PM	1.1	3.8	8.0	4.2
PA	1.3	2.6	6.0	3.4
PF	0.8	5.9	10.8	5.0
PFB	0.8	5.3	9.7	4.4
PFM	1.0	3.5	7.1	3.6
PFA	0.7	3.8	6.3	2.5

P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

Al compararse con la guía para la interpretación de análisis de suelos según Donald & Kass (1998) (Tabla 25) se encuentra lo siguiente:

Si la relación entre calcio y magnesio se encuentra entre 2 y 5 unidades, existe balance entre los cationes. En este caso todos los tratamientos presentan valores menores a 2 unidades, esto significa que el contenido de magnesio en la disolución del suelo es muy alto, respecto al contenido de calcio en el material, por lo que la relación de estos dos cationes en se encuentra en desbalance (Donald & Kass, 1998).

Cuando esto sucede la velocidad de adsorción de calcio por las raíces de la planta se bloquea parcialmente. Al haber una deficiencia de calcio, la planta tiene un desarrollo raquíptico del tallo, hojas y del sistema radicular. Por lo tanto las raíces no pueden explorar otras áreas en el suelo en busca de nutrientes (Russell 1959).

La relación entre magnesio y potasio no presenta ningún problema en el tepetate, los valores van de 2.6 a 5.9 unidades. Todos los tratamientos se encuentran dentro del rango ideal en el balance entre estos dos cationes.

Respecto a la relación de calcio y magnesio entre potasio, se observa que todos los tratamientos presentaron valores menores a 10 unidades, a excepción de PF (planta y fertilizante) que presenta 10.8. Tomando en cuenta que el rango adecuado entre estos cationes es de 10 a 40 unidades, se considera que el contenido de estos cationes está en desbalance. En éste caso se puede observar el efecto del estiércol sobre las relaciones entre cationes, mientras aumenta la dosis de estiércol, los valores decrecen, alejándose del rango adecuado.

Por último, la relación entre calcio y potasio se encuentra desbalanceada en todos los tratamientos, con valores por debajo de 5 unidades. Esto indica que el contenido de calcio no es proporcional respecto al de potasio.

En este caso el Ca al encontrarse en proporciones inadecuadas, dificulta la adsorción de K. Este catión es fundamental en el proceso de la fotosíntesis, cuando el potasio es deficiente, las hojas de los cultivos se secan y se endurecen en los bordes mientras que las superficies presentan clorosis, como consecuencia la fotosíntesis es poco activa y la síntesis de almidón prácticamente detenida (Russell, 1959; Buckman y Brady, 1985).

Tabla 25. Relaciones adecuadas entre cationes. Tomado de Donald & Kass (1998).

	Desbalance	Balance	Desbalance
Ca/Mg	<2	2 - 5	> 5
Mg/K	<2.5	2.5 - 15	> 15
Ca+Mg/K	<10	10 - 40	> 40
Ca/K	<5	5 - 25	> 25

Otro factor importante que influyó en gran parte a la producción de biomasa fue el alto contenido de Na⁺ debido a la antropización de este material. Como se menciona anteriormente (Tabla16) los valores del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) son considerablemente altos. Los tratamientos con planta y estiércol presentan valores por encima de 15 por ciento de sodio intercambiable. En el caso de cultivos de sorgo puede presentarse una reducción de hasta el 50% en el rendimiento cuando los valores de PSI son de 15 a 25% (Vázquez, 1997).

La influencia de la salinidad es mayor en las plantas jóvenes y sobre el crecimiento vegetativo, además se sabe que la salinidad en el suelo disminuye la capacidad de absorción de Ca⁺ por las plantas (Russell, 1959; Fassbender y Bornemisza, 1987).

El tepetate al estar confinado en una maceta no permite pérdidas de los cationes liberados por el material o bien, los aportados por el estiércol y tomando en cuenta que las principales pérdidas de calcio y magnesio en el suelo son regularmente por el lavado y por erosión, los diferentes cationes se han ido acumulando a lo largo del tiempo, causando un desbalance entre ellos (Buckman y Brady, 1985; García *et al.*, 2008).

9.4. Análisis selectos de laboratorio

9.4.1. Óxidos de elementos mayores

En la tabla 26 se presentan los resultados de los óxidos de elementos mayores. Sus porcentajes son representativos de materiales volcánicos básicos. Como puede observarse, las variaciones de los elementos Si, Al, Ti y Fe en la composición del tepetate son mínimas, lo cual resulta congruente, ya que dichos elementos son considerados inmóviles por su alta estabilidad, (Escamilla *et al.*, 2002) por lo tanto no son fácilmente lixiviados.

En general, el orden de abundancia de los óxidos fue: $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{TiO}_2$. Siendo el óxido de sílice el que se encuentra en mayor proporción en el material (con 52% en el testigo absoluto). El orden de abundancia que presentan es característico de los materiales volcánicos que constituyen tepetates (Gama *et al.*, 2007).

Por otra parte, los óxidos de magnesio, calcio, sodio y potasio se consideran elementos móviles en los procesos de alteración. Como se aprecia en la Tabla 26, dichos óxidos presentan, en todos los tratamientos, una tendencia a incrementar sus porcentajes respecto a TAB. Esto sugiere un enriquecimiento secundario del tepetate, debido a los tratamientos utilizados.

El orden de abundancia que presentan estos elementos móviles es $\text{CaO} > \text{Na}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{K}_2\text{O}$. En este caso el elemento predominante es el óxido de calcio con una variación de 2.64 a 3.63.

En el caso del potasio se observa claramente que los valores más altos los presentan aquellos tratamientos con dosis altas de estiércol (TA, PA y PFA) y por el contrario los valores más bajos corresponden a los tratamientos sin estiércol (TAB, P y PF). Los porcentajes de óxidos de potasio son bajos (sin llegar al 2 %); esto sugiere un proceso de meteorización débil que consiste en una pérdida paulatina de cationes alcalinos y alcalinotérreos (Domínguez *et al.*, 2011).

Tabla 26. Concentración de óxidos de elementos mayores

	-----%-----							
Tratamientos	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
TAB	52.70	1.03	21.24	7.48	1.45	2.64	1.62	0.51
TB	54.44	0.99	20.68	6.99	1.57	2.97	1.95	0.66
TM	53.72	0.99	21.01	7.05	1.73	3.58	2.38	0.73
TA	54.69	0.96	20.66	6.71	1.52	3.63	2.56	0.86
P	53.25	0.99	20.80	7.24	1.70	3.21	1.92	0.54

PB	53.51	1.00	20.82	6.99	1.49	3.34	2.29	0.68
PM	52.52	0.98	20.87	7.12	1.63	3.41	2.28	0.69
PA	53.39	0.97	20.88	6.88	1.65	3.44	2.31	0.78
PF	54.72	1.00	20.09	6.93	1.50	2.93	1.94	0.65
PFB	54.60	0.97	20.42	6.89	1.59	3.13	2.06	0.66
PFM	53.58	0.97	20.97	7.01	1.55	3.34	2.23	0.66
PFA	54.06	0.95	20.45	6.61	1.51	3.61	2.52	0.81

Los valores son resultado del análisis de muestras compuestas conformadas por las cuatro repeticiones de cada tratamiento. Donde: TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

9.4.2. Índices de intemperismo

El cálculo de los índices se basa en las reacciones entre los óxidos menos móviles (Al_2O_3) y los más móviles (CaO , Na_2O , K_2O), las proporciones entre concentraciones de elementos debe decrecer con el tiempo y conforme la lixiviación progresa. Los valores obtenidos en cada muestra son comparados con los valores del testigo absoluto (TAB) tomándolo como punto de comparación, de esta forma se puede determinar si existe evidencia de meteorización (Escamilla *et al.*, 2002; Jasso *et al.*, 2012).

En la tabla 27 se muestran los índices de intemperismo evaluados: (i) Índice de Parker (IP), (ii) relación sílice-aluminio (SA), (iii) índice alteración química (CIA), (iv) relación bases-alúmina (Bases/Alúmina), y (v) relación bases-sesquióxidos (Bases/ R_2O_3). Los cuales fueron calculados a partir de los resultados de la evaluación de óxidos de elementos mayores (Tabla 26).

Tabla 27. Índices de intemperismo

Tratamientos	IP	SA	CIA	Bases / Alumina	Bases / R_2O_3
TAB	41.40	4.35	72.60	0.15	0.43
TB	48.76	4.50	68.93	0.19	0.50
TM	57.73	4.45	65.20	0.22	0.58

TA	60.52	4.50	63.76	0.25	0.60
P	48.61	4.40	68.47	0.17	0.52
PB	54.15	4.45	66.32	0.21	0.54
PM	55.01	4.35	66.11	0.21	0.56
PA	56.51	4.40	65.70	0.22	0.57
PF	48.07	4.78	68.54	0.18	0.50
PFB	50.79	4.50	67.59	0.20	0.53
PFM	53.47	4.45	66.73	0.21	0.54
PFA	59.39	4.50	63.84	0.24	0.60

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: TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

Índice de Parker (IP)

Para el índice de Parker, los valores disminuyen a medida que se pierden las bases (desbasificación), por lo tanto; los valores altos de éste índice, indican una débil a nula pérdida de bases. Así, cuando los valores decrecen. Se establece teóricamente, que los cationes se han perdido por efecto de intemperismo (Escamilla *et al.*, 2002).

Como se observa en la tabla 27 los valores de éste índice fluctuaron de 60.52 a 41.40, el dato mayor corresponde al tratamiento TA (testigo con dosis alta de estiércol) y el menor a TAB (Testigo absoluto). Tomando en cuenta que los valores más pequeños obtenidos en el índice de Parker corresponden a los tratamientos que propician más la desbasificación (Jasso *et al.*, 2012), se podría considerar que el testigo absoluto fue el más desbasificado por lixiviación, propiciada por el riego, y que el menos desbasificado y consecuentemente el menos intemperizado fue TAB. Este supuesto es erróneo, ya que los tratamientos, en particular los que presentan estiércol, aportaron bases, la que se acumularon en el tepetate como coadyuvados por la presencia de un drenaje nulo (macetas con drenaje confinado).

En la tabla 27 se aprecia claramente que los valores de IP tienden a incrementarse al aumentar la dosis de estiércol, mientras que los valores más bajos corresponden a los tratamientos sin estiércol. Esto indica que el estiércol es el tratamiento que provee más bases, incluyendo sodio.

Relación Sílice-Aluminio (SA)

La relación de intemperismo sílice/aluminio es buen indicador del grado de alteración química en rocas volcánicas (Irfan. 1999). Se estima que a medida que los valores de esta relación decrecen, la pérdida de sílice se incrementa (Jasso et al., 2012), Empero, mientras más alto sea el índice SA denota una menor alteración (Díaz *et al.*, 2010).

En general los valores resultantes de la evaluación de SA no muestran gran variación. Los valores obtenidos (Tabla 27) fluctuaron de 4.78 a 4.35, Dichos resultados se asemejan a los obtenidos por Flores *et al.*, (1996) en material de la misma zona, donde encontraron niveles de 5.27 a 4.55. En esta investigación se establece que el grado de intemperismo es muy bajo.

Como se observa en la tabla 27 no existe ninguna tendencia de alteración química por parte de los tratamientos sobre los resultados de SA, ya que todos los valores incrementaron respecto a TAB. Lo mismo sucede en otro estudio con tepetate de la misma zona donde Atilano (2014), reporta valores que van de 3.8 a 4.

Índice de alteración Química (CIA)

Los valores altos de CIA reflejan la pérdida de elementos móviles relativos a los constituyentes residuales estables durante la meteorización (Duzgoren *et al.*, 2002). Los valores bajos (50) indican una nula alteración química. Los valores de CIA para rocas frescas y minerales no alterados, son consistentemente cercanos a 50 o menores.

Por otra parte, se estima que las muestras con valores de CIA inferiores a 65 indican un bajo intemperismo químico, valores entre 65 y 80 indican intemperismo químico moderado y valores de más de 80 un intemperismo químico extremo (Domínguez *et al.*, 2011). Como se observa en la tabla 27 para este índice, los valores encontrados fueron de 72.60 a 63.76, el dato más alto correspondió a TAB y el más bajo a TA (Tabla 27).

Similar a lo que ocurre con el índice de Parker se podría considerar que el testigo absoluto fue el más alterado por lixiviación de elementos móviles y que el menos alterado fue TA. Este supuesto también resulta erróneo, ya que como en el caso de IP los tratamientos, aportaron bases, la que se acumularon en el tepetate como consecuencia de un drenaje nulo (macetas sin drenaje).

En general, los valores CIA de intemperismo relacionados con los tratamientos, son bajos.

Relación Bases-Alúmina

La relación bases/alúmina indica el grado de intemperismo de los feldespatos. Se interpreta que al incrementarse los valores de este índice aumenta la disolución de los feldespatos (Duzgoren *et al.*, (2002). Una relación más grande que la unidad indica un suelo alcalino o de desarrollo débil (Escamilla *et al.*, 2002).

Los valores registrados en este índice fueron de 0.25 a 0.15 (Tabla 27); aunque casi en todos los tratamientos hubo pérdidas de Na_2O y K_2O , el nivel de intemperismo por desbasificación que muestra este índice es reducido.

Bases-Sesquióxidos

Esta relación es alta en etapas iniciales de intemperismo y muy baja cuando se llega a etapas finales de desarrollo, ya que el suelo ha perdido en gran parte sus cationes y posee valores de pH neutros o ácidos (Escamilla *et al.*, 2002).

Los valores encontrados aquí fueron de 0.60 a 0.43. El valor más alto fue para TA y el más bajo para TAB. Lo cual coincide con los valores de PI y CIA. Estos resultados menores de 1 indican que no hay dominio de las bases sobre los sesquióxidos (Duzgoren *et al.*, 2002).

9.4.3. Análisis mineralógico de la muestra total y de la fracción de arcilla fina menor a $2\ \mu\text{m}$

En la tabla 28 se muestra el nombre del mineral identificado junto con la fórmula química, donde PDF es la clave del mineral. En general los minerales encontrados en ambas muestras son anortita, ópalo, augita y magnetita.

Tabla 28. Resultado de los análisis de difracción de Rayos X en muestra total

Muestra	Forma identificada	Ficha PDF	Observaciones
Testigo (TAB) DRX1	Anortita (Ca, Na) (Al, Si) $2\text{Si}_2\text{O}_8$	9-0465	<ul style="list-style-type: none"> Presencia de Haloisita, Anfíboles Piroxeno
	Ópalo $\text{SiO}_2 \cdot x\ \text{H}_2\text{O}$	38-0448	
	Augita Ca (Mg, Fe) Si_2O_6	24-0203	
	Magnetita $\text{Fe} + 2\text{Fe}_2 + 3\text{O}_4$	19-0629	
PFA DRX2	Anortita (Ca, Na) (Al, Si) $2\text{Si}_2\text{O}_8$	9-0465	<ul style="list-style-type: none"> Presencia de Anfíboles Haloisita
	Ópalo $\text{SiO}_2 \cdot x\ \text{H}_2\text{O}$	38-0448	

	Augita $\text{Fe}+2\text{Fe}_2+3\text{O}_4$	24-0203	Piroxeno
	Magnetita $\text{Fe}+2\text{Fe}_2+3\text{O}_4$	19-0629	

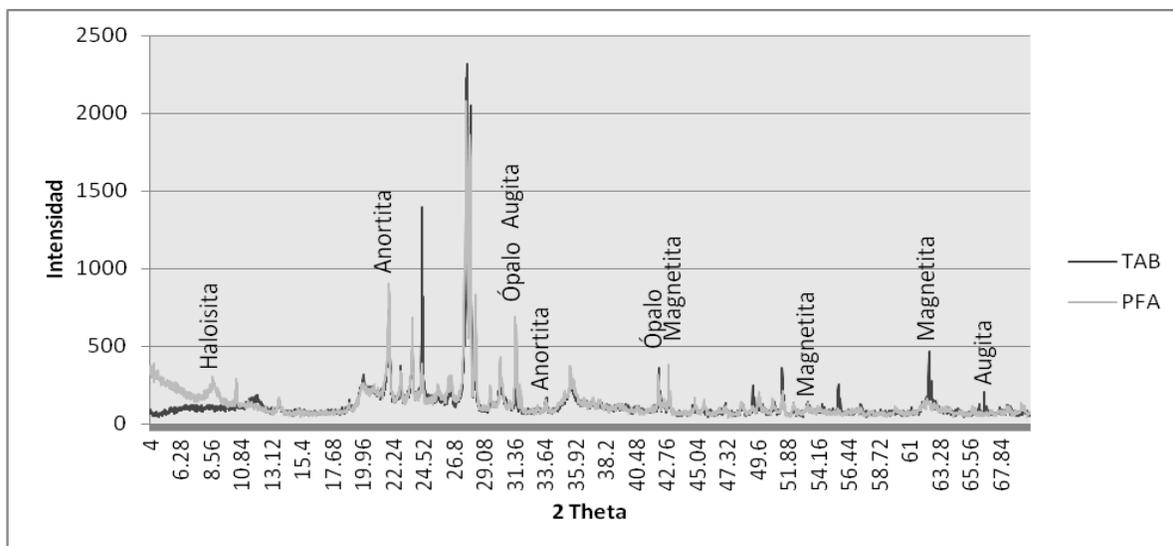


Figura 9. Difractograma del análisis de la muestra total. Donde se refleja la presencia de los minerales y los picos característicos de los mismos.

Los resultados de la mineralogía de la muestra total (Tabla 28 y Figura 9), concuerdan con lo mencionado por Acevedo (1998), donde resume que entre los minerales más frecuentes en los tepetates de México se encuentra: ópalo, cuarzo augita, magnetita, feldespatos sódicos, horblenda y anortita.

Mineralogía la fracción de arcilla fina menor a 2 μm

La tabla 29 muestra el tipo de arcilla encontrada en las muestras TAB y PFA

Tabla 29. Resultado de los análisis de difracción de Rayos X en la fracción arcilla (<2 μm)

Muestra	Picos sin tratamiento	Picos con etilenglicol	Picos a 550°C	Picos con formamida	Forma identificada.
TAB	10 Å	10 Å	-----	10 Å	Haloisita
PFA	10 Å	10 Å	-----	10 Å	Haloisita

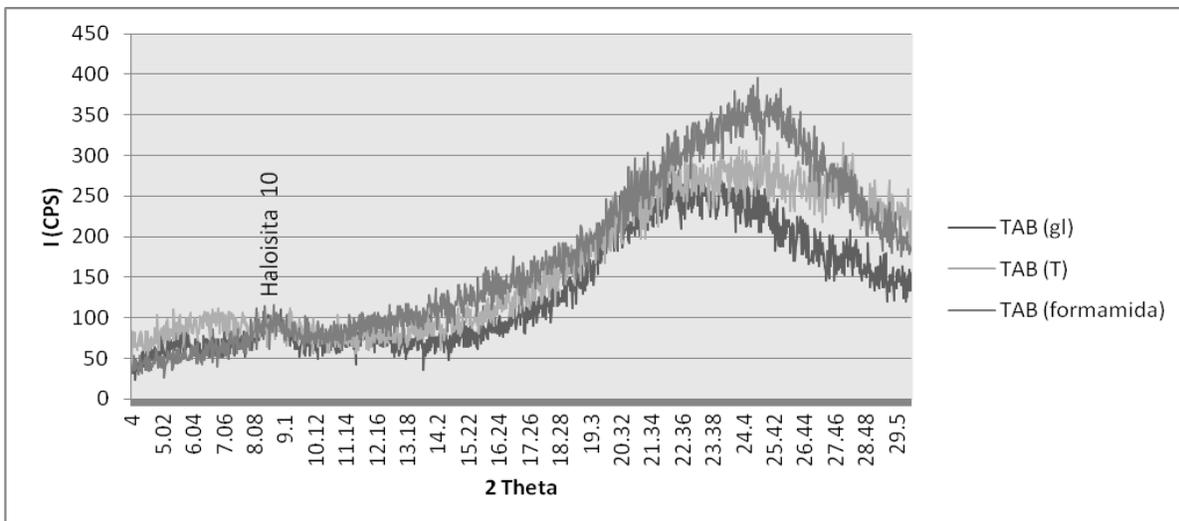


Figura 10. Difractograma de la fracción arcilla de la muestra TAB (Testigo absoluto). Donde se identifica la presencia de Haloisita 10.

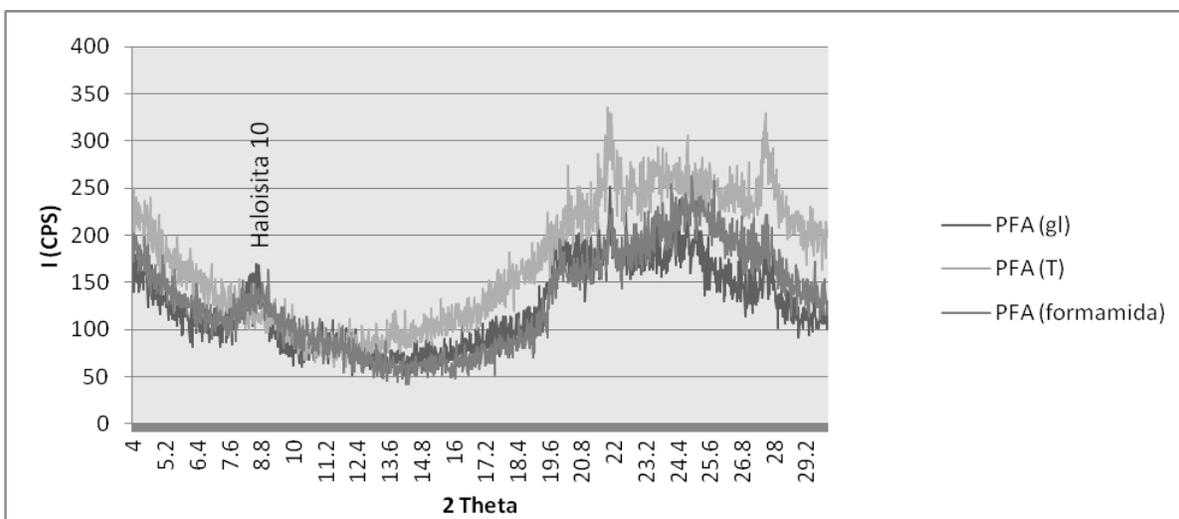


Figura 11. Difractograma de la fracción arcilla de la muestra PFA (planta con fertilizante y dosis alta de estiércol). Donde se identifico la presencia de Haloisita 10.

En general se identificó en ambas muestras la presencia de haloisita 10, esto concuerda con lo reportado por Peña & Zebrowski (1992), donde describen la composición mineralógica de tepetates la presencia de haloisita 10.

De igual manera Correa & Flores (2004), encuentran haloisita en análisis mineralógicos en tepetate, mencionan que ésta es una arcilla con presencia dominante, resultado de procesos de intemperismo *in situ* que presentan el vidrio volcánico, feldespatos y aluminosilicatos.

9.4.4. Análisis micromorfológico y morfométrico de agregados.

Análisis micromorfológico

En la tabla 30 se muestra el conjunto de características observadas en el tepetate.

Tabla 30. Rasgos morfológicos encontrados en el tepetate

Tratamiento	Intemperismo	Carbonatos	Iluviación	Porosidad	Estiércol no degradado	Agregación	Óxidos e hidróxidos de Fe y Mg	Tejido fresco	M. orgánica
Muestra PFA (planta con fertilizante y dosis alta de estiércol)	X	np	X- XX	XX	XX	X	X	X	XX

np= no presente X= baja; XX=media; XXX= alta

Los rasgos micromorfológicos encontrados en el tepetate muestran lo siguiente:

Existe un predominio de revestimientos arcillosos de color amarillo que cubren los poros (Figura 12c). Estos revestimientos suceden cuando las arcillas finas menores a $.002 \mu\text{m}$ entran en suspensión y posteriormente son iluviadas a horizontes o capas inferiores, depositándose en los poros (Acevedo *et al.*, 2004).

Además, se observa la presencia de nódulos de Fe, esto se relaciona con condiciones de óxido-reducción, lo que hace suponer que el material estuvo bajo saturación hídrica (*in situ*) (Acevedo *et al.*, 2004).

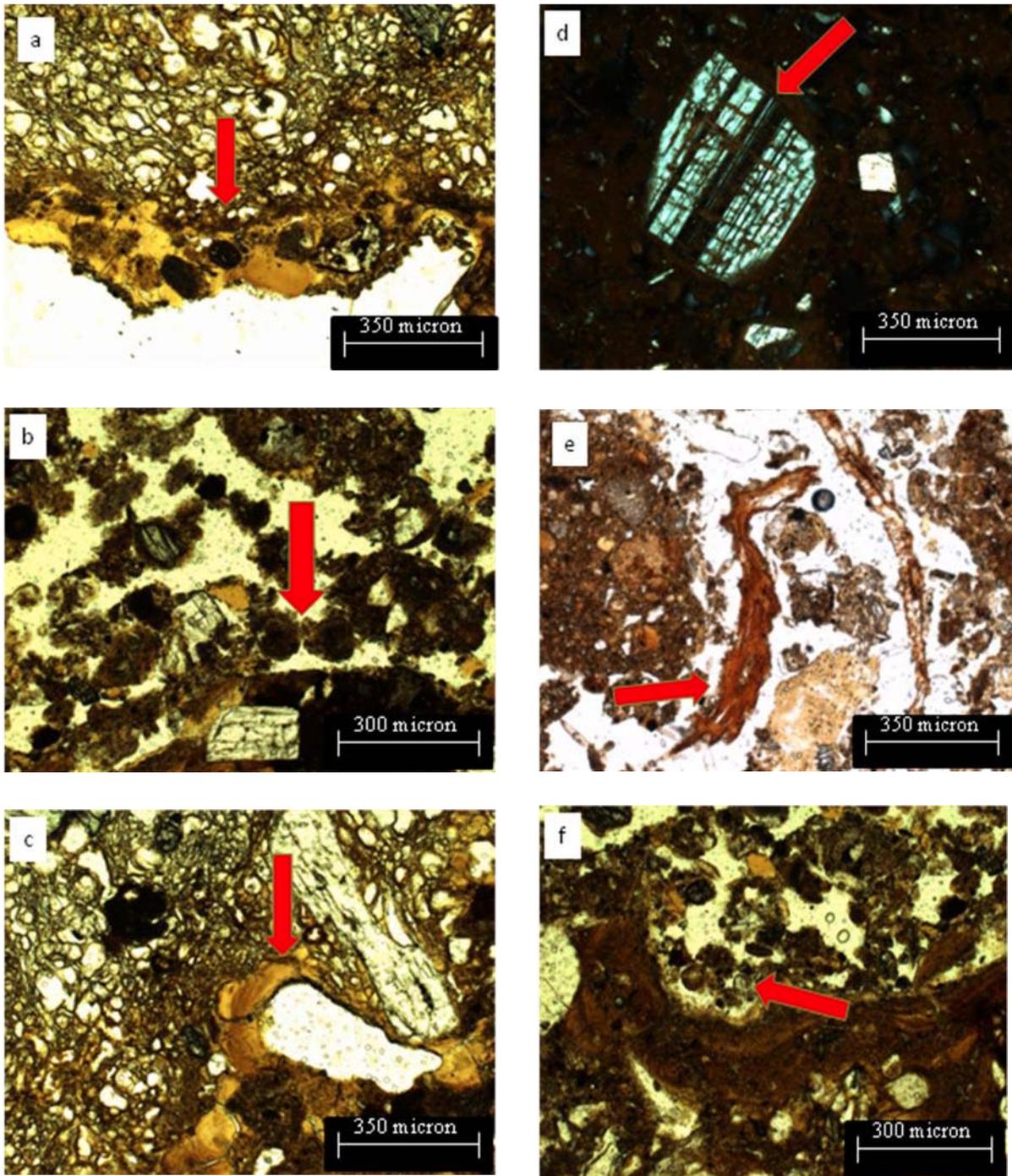


Figura 12. Micromorfología de la muestra PFA. **(a)** Vidrio volcánico con revestimientos de arcilla iluviada. **(b)** Presencia de microagregados. **(c)** Arcilla iluviada alrededor de un poro. **(d)** Plagioclasa con cierto grado de intemperismo. **(e)** Presencia de materia orgánica en la unión entre agregados. **(f)** Inicio de una incipiente agregación.

Respecto a los minerales, se encontró gran cantidad de plagioclasas y ferromagnesianos, los cuales presentan cierto grado de intemperismo (*in situ*) (Figura 12d).

Se puede observar algunos restos frescos de materia orgánica, que debe tratarse del estiércol adicionado durante el experimento. Éste se encuentra formando complejos organominerales (Figura 12e), favoreciendo la agregación. En la figura 12b se aprecia la presencia de microagregados de tipo subangular que rompen a granular. Lo anterior muestra que aun cuando la agregación es incipiente (Figura 12f), este proceso está presente.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis mineralógico y micromorfológico (Tabla 28 y Figura 12), se observa que los minerales encontrados en el tepetate, corresponden a materiales jóvenes y poco intemperizados, en donde aun dominan minerales primarios. Esto demuestra que no hay la posibilidad de que exista cohesión entre las partículas para la formación de agregados.

Análisis morfométrico

Se reporta un porcentaje de 59.79 a 81.26% de agregados y 16.32 a 37.59% de porosidad (Tabla 31).

La presencia de agregados en esta muestra se debe a los contenidos de estiércol y a la acción de las raíces de la planta. Cuando éstas penetran al material, generan la agregación de partículas por diferentes mecanismos como la envoltura o enrollamiento físico y el empaquetamiento de las partículas. Otro factor que favorece la agregación es la cementación de las partículas por secreciones mucilaginosas resultado de los compuestos orgánicos (exudados) generados durante el desarrollo de la raíz. (Acevedo *et al.*, 2001; Acevedo *et al.*, 2002; Guerrero *et al.*, 2013).

A continuación se presentan cuatro secciones de la lámina delgada correspondiente al tratamiento PFA (planta con dosis alta de estiércol y fertilizante químico).

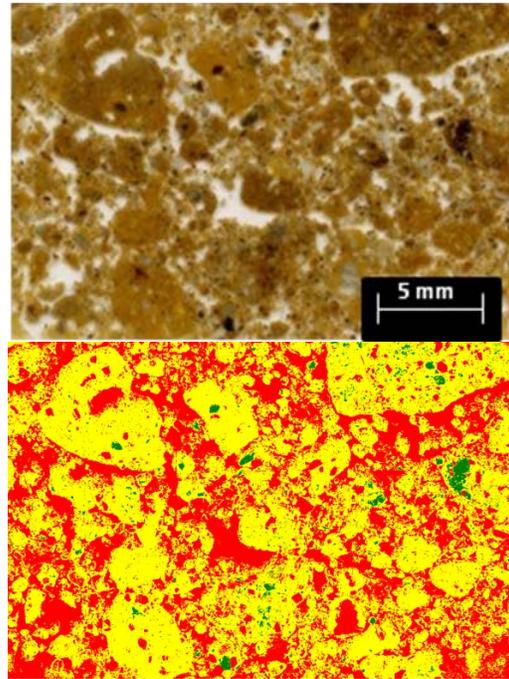


Figura 13. Sección 1 (lámina delgada), cuya área es de 343.54 mm², donde se delimitaron de color rojo los poros, de color amarillo los agregados y verde las concreciones de fe.

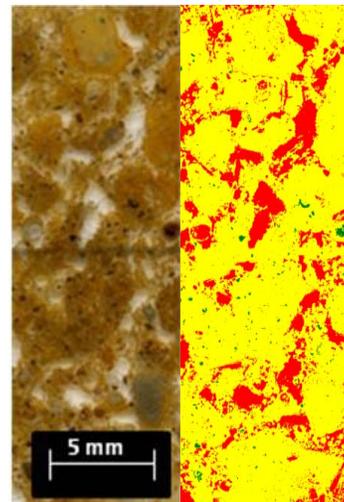


Figura 14. Sección 2 (lámina delgada), cuya área es de 77.655 mm², donde se delimitaron de color rojo los poros, de color amarillo los agregados y verde las concreciones de fe.

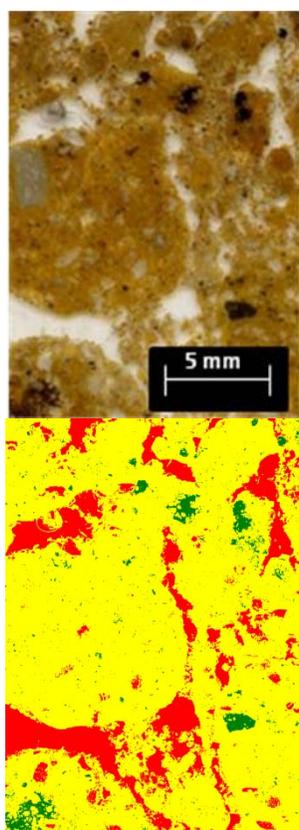


Figura 15. Sección 3 (lámina delgada), cuya área es de 127.407 mm², donde se delimitaron de color rojo los poros, de color amarillo los agregados y verde las concreciones de fe.

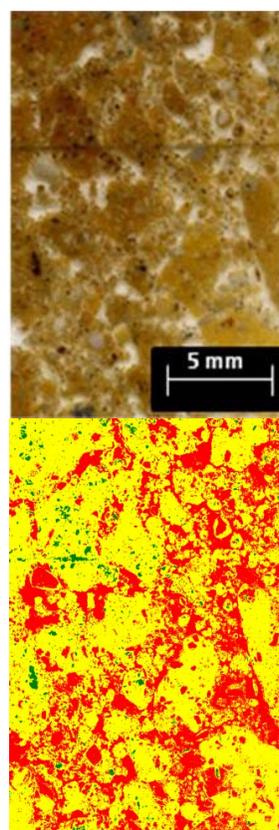


Figura 16. Sección 4 (lámina delgada), cuya área es de 172.934 mm², donde se delimitaron de color rojo los poros, de color amarillo los agregados y verde las concreciones de fe.

Tabla 31. Valor en porcentaje del área de cada rasgo morfológico

	Área (%)		
	Poros	Agregados	Concreciones de Fe
Sección 1	37.59	59.79	1.90
Sección 2	19.67	80.18	0.78
Sección 3	16.32	81.26	2.79
Sección 4	33.49	64.96	2.12

9.5. Índices de calidad del tepetate

9.5.1. Selección

Del conjunto de análisis mencionados en la metodología (Tabla 4), fueron utilizados como índices de calidad (Anexo III) los siguientes: (1) agregados; (2) desleimiento; (3) potencial de hidrógeno (pH) en agua; (4) conductividad eléctrica (CE); (5) materia orgánica (MO); (6) capacidad de intercambio catiónico (CIC); (7) saturación de bases intercambiables (SB) y (8) relación Ca: Mg). En la tabla 32 se presentan los resultados analíticos obtenidos para las ocho características seleccionadas

Tabla 32. Características físicas y químicas del tepetate

Tratamientos	Agregados	Desleimiento	pH	CE	MO	CIC	SB	Ca:Mg
TAB	No Presenta	—	6.47±0.25d	1.63±0.27b	0.16±0.07f	27.24±1.11a	85.4	0.8±0.2ab
TB	No Presenta	—	6.75±0.42cd	3.05±0.95cd	0.48±0.17ef	24.57±0.72a	100	0.7±0.2b
TM	No Presenta	—	6.88±0.09bcd	3.37±0.11c	0.72±0.12ce	22.62±1.16a	100	0.8±0.3b
TA	No Presenta	—	7.34±0.29ab	4.55±0.78f	1.26±0.22bd	23.19±2.02a	100	0.7±0.2b
P	Escasos (<5% vol)	Estructura inestable	7.01±0.15abcd	1.54±0.21b	0.31±0.04ef	25.18±1.38a	98.5	0.7±0.2b
PB	Escasos (<5% vol)	Estructura inestable	7.19±0.13abc	1.80±0.17ab	0.71±0.08ce	23.33±0.98a	100	0.7±0.1b
PM	Escasos (<5% vol)	Estructura inestable	7.12±0.23abc	2.24±0.35abd	1.01±0.21cd	26.04±1.65a	100	1.1±0.4ab
PA	Escasos (<5% vol)	Estructura inestable	.48±0.21a	2.40±0.28abcd	1.94±0.36a	25.11±1.04a	100	1.3±0.1a
PF	Escasos (<5% vol)	Estructura inestable	6.68±0.16cd	1.86±0.17ab	0.41±0.08ef	22.54±0.79a	100	0.8±0.1ab
PFB	Escasos (<5% vol)	Estructura inestable	6.82±0.18bcd	2.38±0.07abcd	0.66±0.11ce	24.05±0.88a	100	0.8±0.1ab
PFM	Escasos (<5% vol)	Estructura inestable	6.99±0.21abcd	2.58±0.18abcd	1.14±0.13bcd	25.56±1.31a	100	1.0±0.1ab
PFA	Escasos (<5% vol)	Estructura inestable	7.06±0.10abc	2.80±0.25acd	1.61±0.41ab	23.98±0.72a	100	0.7±0.0b

Valores con letras diferentes son estadísticamente diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$). TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.

La razón para no incluir como índices de calidad al color, la densidad real y la textura, se debe a que las características físicas y químicas de estos parámetros, no variaron morfométricamente con ninguno de los tratamientos utilizados, permaneciendo sus valores, similares al testigo absoluto.

En contraste, los análisis de densidad aparente tampoco se utilizaron en virtud de que los valores obtenidos, son muy variables. La probable causa de esta heterogeneidad se interpreta debido a que el tepetate estudiado, presenta en su matriz, una intergradación entre un fragipán y un duripán.

Finalmente, tampoco se incluye las clases de tamaño de partícula, dado que los tamaños y porcentajes de los terrones obtenidos de cada tratamiento, son variables artificiales que dependen de la intensidad de energía utilizada para roturar al tepetate.

9.5.2. Valorización de los índices de calidad

Es necesario comentar que los índices de calidad solo son relativos al grado de habilitación del tepetate, pero son independientes del grado de desarrollo de la vegetación (Biomasa).

Con base en los criterios establecidos por Doran y Parkin. (1994; 1996) y Altieri and Nicholls (2002), los cuales se resumen en el anexo III, se valorizan las ocho características seleccionadas. En la Tabla 33, los valores asignados a cada característica, representan los índices de calidad que muestra el tepetate después de los tratamientos vs testigo absoluto.

Tabla 33. Evaluación de índices de calidad en el tepetate

Tratamiento	Agregados	Desleimiento	pH	CE	(MO%)	CIC	SB	Ca:Mg	Total
	(%)	(estabilidad)							
TAB	1	---	10	10	1	10	10	1	43
TB	1	---	10	10	1	10	10	1	43
TM	1	---	10	5	1	10	10	1	38
TA	1	---	10	5	5	10	5 FS	1	32
P	5	1	10	10	1	10	10	1	48
PB	5	1	10	10	1	10	5 FS	1	43
PM	5	1	10	10	1	10	5 FS	5	47
PA	5	1	10	10	5	10	5 FS	5	47
PF	5	1	10	10	1	10	10	1	48
PFB	5	1	10	10	1	10	5 FS	1	43
PFM	5	1	10	10	1	10	5 FS	5	47
PFA	5	1	10	10	5	10	5 FS	1	47

TAB: Testigo absoluto; TB: Testigo con dosis baja de estiércol; TM: Testigo con dosis media de estiércol; TA: Testigo con dosis alta de estiércol; P: Planta (sorgo) PB: Planta con dosis baja de estiércol; PM: Planta con dosis media de estiércol; PA: Planta con dosis alta de estiércol; PF: Planta con fertilizante; PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol; PFM: Planta con fertilizante y dosis media de estiércol; PFA: Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol; FS =FASE SALINA.

Los resultados expuestos en las tablas 32 y 33 permiten evaluar en una primera aproximación, el grado de eficiencia vs limitaciones de los tratamientos utilizados para la habilitación del tepetate. Las principales consideraciones al respecto son:

Tratamientos en testigos

A. Ninguno de los tratamientos aplicados a los testigos TAB; TB; TM y TA propició el desarrollo de agregados (valor 1).

B. El testigo absoluto (TAB), mostró valores de calidad óptimos (10) en las características químicas de pH; CE; CIC y SB. En contraste, presentó valores restrictivos en los porcentajes de MO y en la relación Ca: Mg (valor 1). La suma del conjunto de valores de las características presentes en TAB fue de 43 (Tabla 33).

C. Con relación a los tratamientos TB; TM y TA se observa:

C1. El tratamiento TB (Testigo con dosis baja de estiércol) presenta un valor similar a TAB. Se interpreta que esto es debido a que el tratamiento TB no tuvo influencia en ninguna de las características del tepetate propuestas como índices de calidad.

C2. Los tratamientos TM (Testigo con dosis media de estiércol) y TA (Testigo con dosis alta de estiércol) presentan respectivamente, valores de 38 y 32 (Tabla 33), siendo ambos más bajos que los que muestra el testigo absoluto (43). Esto se interpreta como una acción negativa de los tratamientos en la habilitación del tepetate. Así, en el caso de TM el tratamiento propició salinidad y en el caso de TA salinidad y sodicidad (Tabla 15). Ambas fases químicas son inducidas por los tratamientos y demeritan significativamente la calidad del tepetate.

Tratamientos en plantas

D. En la tabla 33 se muestra que todos los tratamientos aplicados al sorgo, propiciaron la formación de agregados, aunque en cantidad escasa y pobre desarrollo y estabilidad (Anexo III). Asimismo se observa que los tratamientos PB (Planta con dosis baja de estiércol) y PFB (Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol) muestran valores similares a TB, por lo cual se consideran tratamientos limitados en su eficiencia para habilitar al tepetate, siendo factores de demérito (Tabla 33) de la calidad, ya que ambos propician la presencia de fases sódicas (Tabla 15).

E. Los tratamientos PM (Planta con dosis media de estiércol); PA (Planta con dosis alta de estiércol); PFM (Planta con fertilizante y dosis media de estiércol) y PFA (Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol.) contribuyeron para incrementar ligeramente, el porcentaje de MO (vg. PA, PFA) o bien, a mejorar las relaciones Ca: Mg (vg. PM; PA; PFM) alcanzando por ello, un valor de 47. Sin embargo, su utilidad práctica como tratamientos para habilitar al tepetate, resultó muy limitada, ya que en todos los casos estos tratamientos propiciaron la existencia de una fase sódica (Tabla 33).

F. Finalmente, los tratamientos P (Planta (sorgo) y PF (Planta con fertilizante) son los que obtuvieron los valores más altos de habilitación del tepetate (48) Dicho valor sugiere un

porcentaje de habilitación del tepetate de 11.6. En ningún caso, muestran un riesgo de generar salinidad o sodicidad.

9.5.3. Observaciones relativas a los índices de calidad utilizados

Agregados

La observación a través del microscopio óptico de las diferentes clases de tamaño de partícula, obtenidos para cada tratamiento, mostró que la formación de agregados es escasa (<5% del volumen total) y que éstos, estructuralmente son poco desarrollados y poco estables (Figura 7).

La escasa formación de agregados y su débil desarrollo y estabilidad (Tabla 32) se puede explicar en función de los siguientes parámetros:

- i. De acuerdo con Gavande, (1986), cuanto mayor es la saturación de la CIC con cationes como el calcio, la agregación resulta viable en su desarrollo y apta en su estabilidad. En cambio, cuando el complejo coloidal está saturado de cationes como el sodio, hay dispersión y por lo tanto la agregación se ve limitada o impedida. Como se observa en la tabla 11 el contenido de calcio intercambiable en todos los tratamientos es bajo, en contraposición con los altos contenidos de sodio, que en los tratamientos TA, PB, PM, PA, PFB, PFM Y PFA, constituyen una fase sódica (> de 15% de sodio intercambiable).
- ii. Desafortunadamente, los porcentajes de materia orgánica detectados en el tepetate son bajos, (Tabla 32) lo que limita el buen desarrollo de colonias de microorganismos que aporten coloides orgánicos en alto porcentaje
- iii. Por otra parte, el casi nulo intemperismo (Tabla 27) que propiciaron los tratamientos en el tepetate, no liberó las cantidades necesarias de coloides minerales (vg. sílice, hierro), que actuaran como cementantes, lo cual también limitó la formación de agregados.

Desleimiento

En general, un 90% de los agregados formados como resultado de los tratamientos, oscilan de extremadamente, a altamente inestables cuando son sumergidos en agua, su valor asignado como índice de calidad es 1 solamente un 10% presenta agregados con estabilidad moderada, pero poca resistencia estructural a permanecer intacto cuando es inmerso por más de 15 minutos. Su valor se estimó en 5 (Tabla 33).

Factor pH

La tabla 32 muestra que con excepción de TAB que presenta un pH ligeramente ácido, y del tratamiento PA cuyo pH es alcalino, los otros tratamientos muestran un pH neutro. De acuerdo con Vázquez 1997, el valor propuesto para evaluar el pH presente en todos los tratamientos es calificado como 10 (Anexo III, Tabla 33), dado que se consideran que son adecuados para el crecimiento de la mayoría de los cultivos.

Conductividad eléctrica

Con excepción de los tratamientos TM y TAB, cuyos valores de conductividad eléctrica (Tabla 32) permiten que solo plantas tolerantes se desarrollen satisfactoriamente y que existan microorganismos tolerantes (hongos, actinomicetes, y algunas bacterias), los demás tratamientos, muestran valores que solo afectan a plantas muy sensibles a moderadamente sensibles. Es posible que en valores próximos a los que muestra TM se vean alterados algunos procesos microbianos como la nitrificación /denitrificación, y que sean influenciados los principales procesos microbianos (respiración/ amonificación. Los valores asignados como índices de calidad son respectivamente de 5 para los tratamientos TM y TAB y de 10 para el resto de los tratamientos (Tabla 33).

Materia orgánica (MO%)

En la tabla 32 se muestra que los porcentajes de materia orgánica generada durante los tratamientos, según Vázquez, (1997) son bajos. En su mayoría dichos porcentajes oscilan de extremadamente pobre a pobre (vg. TAB; TB; TM; P; PB; PM; PF; PFB; PFM) siendo sus valores como índices de calidad 1. Solo existen dos tratamientos cuyo porcentaje de materia orgánica califica como medianamente pobre (vg. TA; PFA) y uno (vg. PA) que presenta un porcentaje que lo acredita como medio. Dichos valores fueron calificados como 5.

Capacidad de intercambio catiónico.

Vázquez 1997 considera que los valores de CIC en todos los tratamientos son altos (Tabla 32) y según el USDA (1996) los valores de $25 \text{ Cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$ o mayores son indicativos de una alta fertilidad potencial, (vg. TAB y tratamientos P; PM; PA y PFM).

Saturación de bases.

De acuerdo con Vázquez (1997), todos los tratamientos presentan una alta saturación de bases, por lo que se les asignó un valor de 10 (Anexo III). Sin embargo, en los tratamientos TA; PB; PM; PA; PFB; PFM y PFA, al menos un 15% de la saturación de

bases está constituida por sodio, amén de porcentajes altos de Mg (Tabla 16). Esto demerita significativamente la calidad de la saturación de bases por lo cual solo se le asigna un valor de 5 (Tabla 33).

Relación Ca : Mg.

Como se observa en la tabla 33 con excepción de los tratamientos PM, PA y PFM, todos los demás, incluyendo los testigos, muestran una relación Ca:Mg <1 indicativo de una muy escasa disponibilidad de Ca (valor 1). Los tratamientos PM, PA y PFM, de acuerdo con Vázquez 1997 muestran valores que representan el límite más bajo aceptable (valor 5).

9.5.4. Biomasa versus índice de calidad

Tabla 34. Biomasa aérea total *versus* valor de índice de calidad

Tratamiento	Biomasa aérea (total de dos cortes)	Porcentaje de producción de biomasa	Índice de calidad	Porcentaje de calidad en tepetate
TAB Testigo absoluto	-----	-----	43	-----
1.PFB: Planta con fertilizante y dosis baja de estiércol	39.36 g peso total	100 alta	43	0 nulo
2. PFM Planta con fertilizante y dosis media de estiércol;	35.27 g peso total	89.6 alta	47	9.3 bajo
3. PM Planta con dosis media de estiércol	31.82 g peso total	80.8 alta	47	9.3 bajo
4. PFA Planta con fertilizante y dosis alta de estiércol	27.38 g peso total	69.6 media	47	9.3 bajo
5. PA Planta con dosis alta de estiércol	21.07 g peso total	53.5 media	47	9.3 bajo
6. PB Planta con dosis baja de estiércol	18.27 g peso total	46.4 media	43	0 nulo
7.P Planta (sorgo)	9.37 g peso total	23.8 baja	48	11.6 bajo
8.PF: Planta con fertilizante	6.54 g peso total	16.6 baja	48	11.6 bajo

Se observa (Tabla 34) que el tratamiento con el porcentaje mayor de producción en biomasa es PFB (planta con fertilizante y dosis baja de estiércol) con 39.36 gramos de peso total, mientras que el tratamiento con menor porcentaje fue PF (planta y fertilizante) con 6.54 g.

Al comparar los valores de índices de calidad contra los porcentajes de producción de biomasa, pareciera ser contradictorio, ya que los tratamientos con mayor porcentaje de biomasa corresponden a los valores de índices de calidad más bajos.

Los tratamientos pudieron mostrar cierta eficiencia en el desarrollo del cultivo de sorgo, pero muy limitada en cuanto a incrementar la calidad del tepetate. En este caso, los tratamientos fueron "eficientes" para el desarrollo del cultivo de sorgo, el cual es semitolerante a la sodicidad. Sin embargo, la calidad se demerita significativamente con la presencia de una fase sódica. Si el cultivo no fuera resistente al sodio, sus valores de biomasa como los de calidad serían bajos.

En general se observa que los tratamientos con estiércol presentan valores mayores a diferencia de los tratamientos que no lo tienen, esto por el aporte de materia orgánica por parte de la enmienda.

Lo que seguramente influyó y determinó la producción de biomasa fue la acumulación de cationes (principalmente sodio) y antagonismo de los mismos (vg. Ca:Mg), impidiendo la adsorción de nutrimentos por parte de la planta y afectando su desarrollo.

10. CONCLUSIONES

- Los valores de pH variaron muy poco ante los tratamientos y se mantuvieron, en todos los casos, dentro del intervalo apropiado para el desarrollo y nutrición del sorgo.
- El estiércol propició la liberación de bases intercambiables, generando un ligero incremento de los valores de pH.
- La materia orgánica fue generalmente pobre en su porcentaje, aunque se incrementó ligeramente en todos los tratamientos que presentaban diversos contenidos de estiércol.
- Los valores de la CIC se mantuvieron en rangos adecuados para la nutrición del sorgo y no se modificaron por efecto de ninguno de los tratamientos.
- El estiércol influyó en el incremento de cationes (Mg, K, Na), así como en las concentraciones inadecuadas de sodio en el material.
- En general el aporte de calcio resultó bajo en todos los tratamientos. Esta deficiencia, aunada a la presencia de porcentajes pobres de materia orgánica, así como a la presencia de una fase sódica, fue una de las principales limitantes para la formación de agregados.
- Las características físicas como color y textura, permanecieron, en todos los tratamientos, sin cambios significativos con respecto al testigo absoluto.
- Las características físicas: densidad aparente y real, así como estabilidad y porcentaje de formación de agregados, no mostraron efecto de tratamientos y no mostraron resultados favorables.
- El tepetate constituye una mezcla compleja de propiedades que son diagnósticas para duripanes y para fragipanes, razón por la cual las características que presenta, principalmente las físicas, resultan muy heterogéneas, contrastantes y variables, por lo que se concluye que este tepetate representa una intergradación genética entre fragipanes y duripanes.
- El cultivo de sorgo, así como los tratamientos aplicados, no afectaron, en ningún nivel, el grado de intemperismo del tepetate, ni su índice de calidad. Dicha calidad se vio demeritada por la presencia de una fase sódica, la cual fue inducida por los tratamientos con estiércol bovino.

- Los tratamientos que utilizaron diferentes porcentajes de estiércol fueron “eficientes” para el desarrollo del cultivo de sorgo. Empero, el tratamiento con la mayor producción de biomasa fue aquel que contenía dosis baja de estiércol (24Mg/ha) y fertilizante químico sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ en dosis de 160 kg de N/ha.

11. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

La formación, desarrollo y estabilización estructural de los agregados son procesos que requieren de un largo tiempo (Velázquez, 2002). En experimentos cuyo objetivo es el de habilitar tepetates, se ha registrado que este proceso resulta eficiente con diferente naturaleza e intensidad, hasta después de dos años (Etchevers, 1997). Con esta base, se sugiere que en estudios posteriores, la presencia de un cultivo seleccionado y de los tratamientos a que esté sometido el tepetate, se extiendan como mínimo dos años.

También es importante mencionar que si se tiene el objetivo de valorar como un índice de calidad la cantidad y grado de desarrollo de los agregados presentes en el tepetate, se sugiere su observación y cuantificación por microscopía óptica, antes y después de la experimentación. De esta forma se podrá diferenciar con mayor exactitud cuáles son los resultados de los tratamientos respecto a la agregación y estabilidad de los mismos.

A partir de la inferencia presentada en esta tesis, la cual plantea la existencia de un tercer tipo genético de tepetate, el cual es resultado de la intergradación entre un duripán y un fragipán; se recomienda determinar de modo analítico y cuantitativo el porcentaje correspondiente a cada tipo (fragipán y duripán). Esto con la finalidad de analizarlos de modo independiente, ya que por sus características tan distintivas y diferentes entre un duripán y un fragipán resulta complejo y con alta incertidumbre trabajarlos como una sola unidad experimental.

Es recomendable en experimentos posteriores incluir análisis que ayuden a evaluar de una forma más completa parámetros como: materia orgánica, contenido de nitrógeno y relación C:N.

Por otra parte, si bien el estiércol es considerado como una fuente importante en el incremento de materia orgánica en la habilitación de tepetates (García, 2005), es importante estimar y cuantificar las dosis y la regularidad con las que se aplican, se ha observado que las prácticas concurrentes aunadas a dosis muy altas de estiércol en los tratamientos, tienden a acumular iones indeseables en el tepetate. Dichos iones particularmente el sodio, son nocivos para los cultivos y desfavorables para otros procesos en el sustrato como la formación de agregados, desarrollo y estabilidad de los mismos. Además será adecuado considerar otras fuentes en el aporte de materia orgánica, como abonos verdes, residuos de cosechas, compostaje o incluso humus de lombriz. Con respecto al calcio intercambiable, el cual resulta frecuente que se presente en el tepetate con bajos porcentajes, se sugiere incluir entre los tratamientos el encalado.

Finalmente, también es importante mencionar que el confinamiento del material (tepetate) en contenedores con drenaje nulo (vg. cubetas), es otro factor desfavorable que influye en la acumulación de cationes y en la consecuente salinización, razón por lo que se podría considerar en estudios posteriores, la implementación de un sistema de drenaje en el diseño experimental, que incluso permita coleccionar y analizar el contenido del lixiviado.

12. LITERATURA CITADA

- Acevedo O., Velázquez A. & Flores D. 2001. *Agregación por especies vegetales y abonos orgánicos en tepetates fracturados en condiciones de invernadero*. Terra 19, pp. 363-373.
- Acevedo O. & Cruz, E. 2002. *Distribución de óxidos de Fe, Al y Si en horizontes endurecidos de origen volcánico*, Agrociencias 36. pp. 401-409.
- 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. pp. 277.
- Acevedo O., Ortiz E., Cruz M., Cruz E. & Flores K. 2004. *Mineralogía, petrografía y micromorfología de horizontes árgicos endurecidos en luvisoles*. Terra Latinoamericana, Universidad Autónoma Chapingo, Vol. 22. pp.143-151.
- 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. pp. 435-449.
- Aguilera N. 1989. *Tratado de edafología de México*. Facultad de ciencias, UNAM, pp. 46-55.
- Aguirre A. 2006. *Química de suelos ácidos, templados y tropicales*: México, UNAM, p. 233.
- Altieri M. & Nicholls C. 2002. *Ecologically based pest Mangement: a key pathway to achieving Agroecosystem Health*. Chapter 98. In: *Managing for Healthy Ecosystems*. D.J. Rapport et al. (eds). CRC Press, Boca Raton.
- Alvarado A. & Forsythe W. 2005. *Variación de la Densidad Aparente en Órdenes de Suelos de Costa Rica*. Agronomía Costarricense 29. pp. 85-94.
- Álvarez J., Gómez D., León N. & Gutiérrez F. 2010. *Manejo integrado de fertilizantes y abonos orgánicos en el cultivo de maíz*. Agrociencia.44. pp. 575-586.
- Andrews S. 2003. *Growers' perceptions and acceptance of soil quality indices*. *Geoderma*, 114(3-4), pp.187–213.
- Arias H. & Torres G. 1992. *Evaluación de la reforestación sobre tepetates en la zona oriente de la cuenca de México*: Terra 10. pp. 430-436.
- Atilano A. 2014. *Enmiendas orgánicas e inorgánicas y maguey mezcalero; Agave angustifolia Haw, en el intemperismo de tepetate fragmentado en condiciones de invernadero*. México. Instituto de Geología. Tesis de Maestría. pp. 127.

- Ávila G. 2011. *La reforestación en la formación de suelo a partir de tepetates*. México. Colegio de Postgraduados. Tesis de Maestría. pp. 111.
- 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. pp. 128.
- Báez A., Etchevers J., Prat C. & Hidalgo C. 2007. *Formation of Aggregates an Carbon Sequestration in Ameliorated Tepetates in the Río Texcoco Basin, México*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 24. pp. 487-497.
- Bautista A., Etchevers J., F. del Castillo R. & Gutiérrez C. 2004. *La calidad del suelo y sus indicadores*. Ecosistemas vol. XIII, 2, Asociación Española de Ecología Terrestre España. pp. 2-11.
- Baver L., Gardner W. & Gardner W. 1991. Física de suelos. México. Ed. Noriega. pp. 189-196.
- Benítez D. & Navarro H. 1996. Rendimiento de maíz-frijol en un tepetate en el segundo año de rehabilitación agrícola. En: Zebrowski C., Quantin, P. y Trujillo G., (Eds.). Suelos volcánicos endurecidos, III Simposio Internacional (Quito, diciembre de 1996), pp. 279-286.
- Bogdan A. 1997. *Pastos Tropicales y Plantas de Forraje (pastos y leguminosas)*, 1° Edición, AGT Editor, pp. 256-257.
- Bohn, H., Mc Neal B. & O' Connor G. 2001. Soil Chemistry. Jhon Wiley & Sons Inc., U.S.A., pp. 20-38, 87-99.
- Buckman O. & Brady C. 1985. *Naturaleza y propiedades de los suelos*. México. UTEHA, pp. 18, 51-52, 375-380, 450, 528.
- Bullock P., Fedoroff N., Jongeius A., Stoops G., Tursina T. & Babel U. 1985. *Handbook for soil thin section description*: Wolverhamton, Reino Unido, Waine Research Publications, p.152.
- Cadahia C. 2005. *Fertirrigación: cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. España. Ed. Mundi-prensa. pp. 308 309.
- Carenas M., Giner J. & Pozo M. 2014. Geología, España: Ed. Paraninfo. p. 227
- Carrento F., Gonzales R. & Villavicencio J. 2000. *Geografía general*. Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Geografía. p. 87.
- Cascales L., Chaparro A., Riquelme A. & Rodríguez F. 2012. *Suelos y agricultura. Los Anthrosoles WRB: Evolución, importancia y distribución*. Universidad Pablo de Olavide. pp. 1-8.

- Castro E. 2012. *Inoculación con Micorrizas Arbusculares como Alternativa en el Cultivo de Shorgum bicolor L. En Cuautla Morelos: México Facultad de Ciencias, UNAM Tesis de licenciatura. 52p.*
- Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO), 2012. Malezas de México. (En línea), (Fecha de consulta 13 de noviembre del 2014) Disponible en:<http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/poaceae/sorghum-bicolor/fichas/ficha.htm>
- Correa G. & Flores D. 2004. *Morfogénesis de suelos con capas endurecidas de la Sierra de Guadalupe, México. TERRA Latinoamericana 22. pp. 255-265.*
- 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, pp. 422-427.*
- Custode E., Noni G., Trujillo G. & Viennot M. 1992. *La Cangahua en el ecuador: caracterización morfo-edafología y comportamiento frente a la erosión. Terra, 10 (número especial). pp. 267-282.*
- Delgadillo L. & Alcalá J. (sin año). *Manual de Procedimientos Analíticos, Laboratorio de Física de Suelos. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Departamento de edafología. pp. 8-9.*
- Díaz J., 2001. *Influencia de Especies Vegetales, Abono y Fertilizantes, Sobre Algunas de las Características Químicas de Tepetate Fragmentado en Condiciones de Campo. México, Facultad de Ciencias, UNAM, Tesis de Licenciatura, pp. 82.*
- Díaz J., Solleiro E., Sedov S. & Cabañas 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, Vol. 62, pp. 469-486.*
- Dicko M., Gruppen H., Traoré A., Voragen A. & Berkel W. 2006. *Sorghum grain as human food in Africa: relevance of content of starch and amylase activities. African Journal of Biotechnology. Vol. 5. pp. 384-395.*
- Dimas J., Estrada A., Martínez E. & Valdez D. 2001. *Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento de maíz. Terra Latinoamericana 19. pp. 293-299.*
- Ditzler A. 2002. *Soil quality field tools: experiences of USDA-NRCS soil quality institute, Agronomy journal, Vol.94, no.1, pp.33-38.*
- Domínguez J., Román A., Prieto F., Acevedo O. & Serrano S. 2011. *Índices de alteración y meteorización de suelos de la región de Denganthza, municipio*

Tepatepec de Francisco I. Madero, Hidalgo. Ingeniería Agrícola y Biosistemas 3(2) pp. 57-65.

- Donald & Kass. 1996. Fertilidad de Suelos. Costa Rica .Ed. Universidad Estatal a Distancia EUNED. 190-193.
- Doran J. & Parkin T. 1994. *Defining and assessing soil quality*. In: JW Doran; DC Coleman; DF Bezdicek & BA Stewart (eds.). Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Special Publication N° 35. Wisconsin, USA.
- Doran J. & Parkin T. 1996. *Quantitative indicators of soil Quality: a minimum data set*. In: Methods for assessing Soil Quality, SSSA Special Publication N° 49, Wisconsin, USA. pp. 25-37.
- Duzgoren N., Aydin A. & Malpas J. 2002. *Re-assesment of chemical weathering indices: case study on pyroclastic rocks of Hong Kong*. Engineering Geology 63: pp. 99-119.
- Escamilla G., Solleiro E., Sedov S. & Gama J. 2002. *Tepetates del glacis de Buenavista, Morelos: interacción de procesos geomorfológicos y pedogenéticos*. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. 48, pp. 76-89.
- Espinoza M., Castro B., Rivera P., Andrade E. & Belmonte F. 2009. *Fertilización orgánica y prácticas de conservación sobre el rendimiento de sorgo de temporal*. Congreso Internacional sobre Desertificación, Murcia, España [EN línea]. [Fecha de consulta 13 de julio de 2014]. Disponible en <http://congresos.um.es/icod/icod2009/paper/viewFile/5401/5119>
- Etchevers J. 1997. *Factores físicos, químicos y biológicos que afectan la productividad de los suelos volcánicos endurecidos*. In: III Simposio Intern. Suelos volcánicos endurecidos. Zebrowski C., Quantin P., y Trujillo G. (eds). Quito, Ecuador. pp. 178-184.
- 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). pp. 171-177.
- Etchevers J., Pérez M., Brito H., Vargas M. & López U. 1998. *La fertilidad de los tepetates del eje neovolcánico en los estados de México y Tlaxcala*. In: Navarro H., Poupon H., Pérez M. (Eds.). Aptitud Productiva en suelos Volcánicos Endurecidos (tepetates). Montecillo, Edo. de México, Colegio de Postgraduados, pp. 17-35.
- Fassbender H. & Bornemisza E. 1987. *Química de Suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Costa Rica: Ed. IICA, 5°, pp. 187-198.
- FENALCE (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales). 2010. *Cultivo de sorgo historia e importancia*. Importancia de los cultivos representados por FENALCE. 20-25. (En línea), (Fecha de consulta: 11 de noviembre del 2014)

Disponible en: www.fenlace.org/arch_public/sorgo93.pdf

- Flores D., Alcalá R., Gonzales A. & Gama J. 1991. *Los Tepetates*. Revista de Geografía, Instituto de Estadística Geografía e Informática, 3, pp. 37-42.
- Flores D., Alcalá R., Gonzales 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, pp. 151-163.
- Flores D., Alcalá R., Gonzales A. & Gamma J. 1996. *Duripans in subtropical and temperature subhumid climate of the Trans-México volcanic belt*: Revista mexicana de ciencias geológicas, UNAM, 13, pp. 228-239.
- Flores D., Muñiz C., Galicia M., Ferrera R. & Zenteno G. 2011. *Enmiendas Orgánicas y durazno, Prunus pérsica (L.) Batsch, en el mejoramiento de una capa endurecida, tepetate tipo duripán*. Boletín de la sociedad Geológica Mexicana 63, pp. 479-486.
- Gama J., Solleiro E., 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, pp. 133-145.
- García A. 2005. *Habilitación de un tepetate por efecto de mejoradores biológicos*. México, Facultad de Ciencias, UNAM, Tesis de maestría, pp. 115.
- 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, pp. 309-315.
- García A., Flores D., García N., Ferrera R. & Velázquez A. 2007. *Habilitación de un Tepetate por Efecto de Mejoradores Biológicos*. Revista Agrocencia, 41, pp. 723-731.
- Gavande S. 1986. *Física de suelos. Principios y aplicaciones*. México ed. Limusa, p. 351.
- Gliessman S. 2002. *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*. Costa Rica Ed. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) p. 107
- Gonzales L. 1987. *Monografía del sorgo*. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón UNAM. pp. 142-146.
- González M. 2013. *Rehabilitación de un suelo salino sódico con enmiendas orgánicas en el desarrollo del cempasúchil (Tagetes erecta L.) en Tláhuac, D.F.*: México, Facultad de Ciencias, UNAM, Tesis de Doctorado. p.197.

- Guerrero E., Luna J. & Caballero E. 1992. *Distribución de los tepetates de la republica mexicana escala 1:4, 000,000*: Terra, 10 (número especial) pp. 131-136.
- Haulon M., Werner G., Flores G., Vera A. & Felix P. 2007. *Assessment of erosion rates during rehabilitation of hardened volcanic soils (tepetates) in Tlaxcala*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 24, pp. 498-509.
- Hidalgo C., Quantin P. & Elsass F. 1997. *Caracterización mineralógica de los tepetates tipo fragipán del valle de México*. Memorias de III Simposio Internacional Sobre Suelos Volcánicos Endurecidos (Quito) pp. 65-72.
- Ibar L. 1984. *Sorgo Cultivo y aprovechamiento*: España Ed. Aedos. pp. 41-49.
- Irfan T. 1999. *Characterization of weathered volcanic rocks in Hong Kong*. Quart. J. Engng. Geol. 29. pp. 5-35.
- Iriondo M. 2007. *Introducción a la Geología*. Argentina: 3° edición. Ed. Brujas. pp. 76-77.
- IUSS Working Group WRB. 2007. *Base referencial mundial del recurso suelo*. Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma. pp. 43-94.
- 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, pp. 110.
- Jackson M. 1970. *Análisis químico de suelos*: Barcelona, España, Edit. Omega, pp. 93-101, 282-286.
- Jasso C., Gama J., Solleiro E. & Díaz J. 2012. *Morfogénesis, procesos y evolución del horizonte Bw cámbrico en tefra-paleosuelos del volcán Nevado de Toluca*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 64 (1). pp.37-47.
- JMP. 2002. JMP[®] Statistics and Graphics Guide Version 5.
- Juscafresa B. 1980. *Forrajes: fertilizantes y valor nutritivo*. España. Ed. Aedos 2°ed. pp. 17-31, 75-85.
- Karlen L., Ditzler A. & Andrews S. 2003. *Soil quality: why and how? Geoderma*, 114(3-4), pp.145–156.
- Karlen, D., Mausbach M., Doran J., Cline R., Harris R. & Schuman G. 1996. Soil Quality; concept, rationale and Research. Needs. *Soil Science Society of America*, Committee.
- Kemper W. & Rosenau R. 1986. Aggregate Stability and Size Distribution. *En Black, C.A. (ed.), Methods of Soil Analysis Part 1 Physical and mineralogical methods*:

Madison, Wisconsin, E.U.A., American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, pp. 425-442.

- Knoepp J. 2000. Biological indices of soil quality: an ecosystem case study of their use. *Forest Ecology and Management*, 138(1-3), pp.357–368.
- krasilnikov P., Jiménez F., Reyna T. & García N. 2011. Geografía de suelos de México. Facultad de ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). pp. 119-128.
- Landon J. 1984. *Booker tropical soil manual. Booker Agriculture International Limited*, Londres, Inglaterra. p. 450.
- López J. 1990. *El diagnostico de suelos y plantas* (Método de campo y laboratorio). España: Ed. Mundi Prensa 4° edición pp. 26-33, 183-194.
- Lynch J. & Bragg E. 1985. *Microorganisms and soil aggregate stability*. Advances in Soil Science, (Estados Unidos). 2. pp. 133 - 171.
- Manahan S. 2007. *Introducción a la Química Ambiental*. Universidad Autónoma de México. UNAM. Ed. Reverte pp. 268.
- Marín G., Argón R. & Gómez B. 2002. Análisis químicos de suelos y aguas. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, España, p.17.
- Munsell. 1975. Soil Color Chart de Munsell Color Company Inc. Maryland, U.S.A
- Navarro H., Poupon H. & Pérez M. 1998. *Potencialidades agronómicas y sistemas rotacionales para la recuperación de suelos volcánicos endurecidos* In: Navarro H., Poupon H., Pérez M. (Eds.). Aptitud Productiva en suelos Volcánicos Endurecidos (tepetates). Montecillo, Edo. de México, Colegio de Postgraduados, pp. 36-59.
- Nett L. Aversch S., Ruppen S., Rühlmann J., Feller C., Eckhard G. & Fink M. 2010. *Does long-term farmyard manure fertilization affect short-term nitrogen mineralization from farmyard manure?* Biol Fertil Soils. 46. pp. 159-167.
- NOM-021-RECNAT-2000, Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad de suelos, estudio, muestreo y análisis. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEARNTAT). pp. 16-35.
- Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la Alimentación (FAO). 1999. *Guía para el manejo eficiente de la nutrición de las plantas*. Italia. 1-20.
- Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación (FAO). 2009. *Guía para la descripción de suelos*. Roma. pp. 34-54.
- Pajares S., Gallardo J., Marinari S. & Etchevers J. 2010. *Indicadores bioquímicos de calidad en tepetates cultivados del eje neovolcánico mexicano*. Agrociencia, 44,

pp. 121-134.

- Peña D. & Zebrowski C. 1992. *Caracterización Física y Mineralógica de los Tepetates de la Vertiente Occidental de la Sierra Nevada*. Terra, 10 (número especial). pp. 156-163.
- 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, 112p.
- Porta J. 1999. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. España. Ed. Mundi Prensa. pp. 190-240.
- Prat C., Ordaz V. & Rugama J. 2003. *Impacto de la Roturación y del Manejo Agronómico de un Tepetate Sobre su Estructura*: Terra Latinoamericana, 21, pp. 109-115.
- Quantin P. 1998. *Orientación y problemática científica para la regeneración y conservación de suelos volcánicos endurecidos y estériles*. In: Navarro H., Poupon H., Pérez M. (Eds.). *Aptitud Productiva en suelos Volcánicos Endurecidos (tepetates)*. Montecillo, Edo. de México, Colegio de Postgraduados pp. 7-16.
- Ramos J., De Carrasco C. & Boluda R. 2002. *Estudio de las características de los antrosoles cumúlicos en los invernaderos de la comarca del poniente almeriense. Influencia de las prácticas agrícolas sobre los cambios de sus propiedades* Edafología, Vol. 9 (2). pp. 129-142.
- Robles R. 1990. *Producción de granos de forraje*: México. Ed. Limusa. 5° Edición.
- Rodríguez J. 2002. *Métodos de análisis de suelos y plantas. criterios de interpretación*. Editorial Trillas. pp. 196.
- Rodríguez S., Ortiz C., Hidalgo C. & Gutiérrez M. 2004. *Los tepetates de la ladera oeste del cerro Tláloc: Saprolita, sin endurecimiento pedológico*. Terra Latinoamericana, Universidad Autónoma Chapingo, Vol. 22. pp.11-21.
- Rozados M., Suárez M. & Méndez H. 2005. *Distribución del Tamaño de Partículas en Suelos Forestales de Galicia (no España) Mediante la Aplicación de Tecnología de Difracción Laser*. Sociedad Española de Ciencias Forestales. pp. 209-214.
- Russell E. 1959. *Las Condiciones del Suelo y el Desarrollo de las Plantas*. España: Ed. Aguilar. pp. 48-53, 581-585.
- Salazar E., Trejo H., López J., Vázquez C., Serrato J., Corona I. & Flores J. 2010. *Efecto residual de estiércol bovino sobre el rendimiento de maíz forrajero y propiedades del suelo*. Terra Latinoamericana, vol. 28, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. México pp. 381-390.

- Secretaria de agricultura, ganadería, desarrollo rural pesca y alimentación (SAGARPA), sin año. *Utilización de estiércoles*. (consultado el 17 de noviembre del 2014) Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Utilizaci%F3n%20de%20esti%20E9rcoles.pdf>.
- Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2008. Bases de Diagnostico: Identificación de Zonas Susceptibles a la Erosión en el Estado de México. pp. 40. (En línea) (consultado el 18 de agosto del 2015) Disponible en: http://qacontent.edomex.gob.mx/idc/groups/public/documents/edomex_archivo/sma_pdf_base_diag_ide_zon_sus.pdf.
- Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera, (SIAP), 2003. *Situación Actual y perspectivas de la producción de sorgo en México 1992-2004*, SAGARPA, México 1-93. (En línea), (Fecha de consulta 15 de noviembre del 2014) Disponible en: http://www.campomexicano.gob.mx/portal_siap/Integracion/EstadisticaDerivada/ComercioExterior/Estudios/Perspectivas/sorgo92-04.pdf.
- Shiringani A. 2005. *Evaluation for hard endosperm, bird-proof sorghum [(Sorghum bicolor L. (Moench)] and its effect on food quality*. Dissertation Thesis Master Degree of Science in Agriculture. Bloemfontein: University of Free State p. 81. (En línea) (Fecha de consulta 15 de noviembre del 2014) Disponible en: <http://etd.uovs.ac.za/ETD-db/theses/available/etd-09122006-111434/unrestricted/ShiringaniAL.pdf>.
- Siebe C., Reinhol J. & Sthar K. 1996. *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. 1ª edición, pp. 18, 24.
- Six J., Paustian K., Elliott E. & Combrink C. 2000. *Soil Structure and Organic Matter: I. Distribution of Aggregate-Size Classes and Aggregate-Associated Carbon*. Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 64, pp. 681-688.
- Sparks D. 1996. Methods of Analysis. Part 3 Chemical methods: Madison Wis., American Society Condition of Yellow Brown Forest Soils in Japan: Geoderma, 130, pp. 146-355.
- Starkey H., Blackman P. & Hauff P. 1984. *The routine mineralogical analysis of clay bearing samples*: U.S. Geological Survey Bulletin, 1563, pp. 1-32.
- Suarez F. 1979. *Conservación de suelos*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Costa Rica. 3ra ed. Ed. IICA. pp. 14-15.
- Tamhane R., Motiramani D. & Bali. 1978. *Suelos su química y fertilidad en zonas tropicales*. Mexico. ed. Diana pp. 483.

- Thompson L. & Troeh F. 1988. *Los suelos y su fertilidad*. España. Ed. Reverté 4ª edición. pp. 265-266 67-68.
- Torres C., Etchevers J., Fuentes M., Govaerts B., De León F. & Herrera J. 2013. *Influencia de las Raíces Sobre la Agregación del Suelo*. Terra Latinoamericana 31. pp. 71-84.
- United States Department of Agriculture (USDA). 1996. *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report. No. 42. pp. 31-33.
- United States Department of Agriculture (USDA). 2002. *Field Book for Describing and Sampling Soils*. National Soil Survey Center. pp. 2-51.
- Valencia C. & Hernández A. 1998. *Manual de prácticas para la caracterización física y química de muestras de suelo y composta*. Editado por el Colegio de Ciencias y Humanidades plantel Atzacapotzalco. UNAM, México. p. 3.
- Vázquez A. 1997. *Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo*. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de suelos 2ª edición. pp. 8-19.
- Velázquez A. & Flores D. 1996. *Formación de agregados estables a partir de un duripán del estado de Morelos (México) por parte de especies vegetales perennes en condiciones de invernadero*.
- 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*, En: Zebrowski C., Quantin, P. y Trujillo G., (Eds.). *Suelos volcánicos endurecidos*, III Simposio Internacional (Quito, diciembre de 1996), pp. 170-177.
- 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 Docotrado, p.126
- Velázquez A., Flores D. & Acevedo O. 2001. *Formación de agregados en tepetate por influencia de especies vegetales*: *Agrociencia*, 35, pp. 311-320.
- Villarreal M. 2007. *Relación Entre La Proporción De Endospermo Duro: Blando y Las Características Físico - Químicas de 9 Híbridos de Sorgo (Shorghum bicolor L. Moench) Cultivadas en el Estado de Morelos*. México UNAM, Tesis de Licenciatura. 81p.
- Warkentin, B. 1996. *Overview of soil quality indicators*. In: GM Cohen & HS Vanderpluym (eds.). *Proc. Soil Quality Assessment for the Prairies*, Agric. Canada, Edmonton. pp. 1-13.
- Werner G. 1992. *Suelos volcánicos endurecidos (tepetates) en el estado de Tlaxcala: distribución, rehabilitación, manejo y conservación*. Terra (número

especial) pp. 318-331.

- Zebrowski C. 1992. Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina: Terra 10 (Número especial: suelos volcánicos endurecidos), pp.15-23.

13. ANEXOS

Anexo I. Características del sorgo (*Sorghum bicolor*)

Uso e importancia

El sorgo constituye un cultivo de gran importancia económica debido al incremento de su consumo en el país, así como alimenticia, por sus características nutricionales semejantes al del maíz; por lo que al respecto es considerado como un sustituto del mismo (SAGARPA 2003).

Así, *Sorghum bicolor* es el quinto cereal cultivado más importante, después del maíz, arroz, trigo y cebada, en materia de producción. Los principales países productores son Estados Unidos, Nigeria, México, China, India, Etiopía, Brasil y Argentina; siendo la producción anual de sorgo en el mundo aproximadamente de 60 millones de toneladas (Dicko *et al.*, 2006). Más del 35% del sorgo cultivado es para el consumo humano, el resto es usado principalmente como alimento para animales, producción de alcohol y productos industriales (Dicko *et al.*, 2006).

En México empezó a adquirir importancia aproximadamente en 1958 en la zona norte de Tamaulipas, cuando comenzó el desplazamiento del cultivo algodónero, con el tiempo este cultivo ha adquirido más importancia y se ha extendido prácticamente a todos los estados de la República (Robles, 1990). Sin embargo, las zonas productoras más importantes corresponden al estado de Tamaulipas, seguido de la zona del bajo: Guanajuato, Jalisco y Michoacán; Aportando el 78 % de la producción total del país. Empero la producción nacional ha sido insuficiente, por lo que ha sido necesario recurrir a las importaciones para cubrir la demanda nacional (SAGARPA, 2003).

La importancia de este cereal en México, es debido a su valor nutrimental, su contenido proteico es de 9 a 11%, 2 a 3% de fibra y 60 a 65 % de almidón. Aproximadamente tiene un 95% del valor biológico del maíz es por eso que es un cereal principalmente utilizado como materia prima para la industria de alimentos para aves, porcinos, bovinos, entre otros, que a su vez son fuentes de alimento para el consumo humano (Castro, 2012).

Las ventajas de cultivar *Shorghum bicolor* son: (a) la capacidad que tiene de desarrollarse en ambientes hostiles y ser más tolerante que otros cereales a diferentes condiciones ambientales; (b) debido a que logra subsistir con costos más bajos, su rendimiento llega a ser mayor por hectárea que otros cereales como el maíz y el trigo y (c) el sorgo tiene alto contenido energético y proteico y sus características nutritivas son muy similares al maíz (Ibar, 1984; González, 1987; Robles, 1990; Villarreal 2007).

Origen y distribución

Es difícil determinar con precisión cuando comenzó a ser cultivado el sorgo, sin embargo se sabe que fue uno de los primeros cereales en ser domesticados y se calcula que tiene aproximadamente 5000 años de ser una especie cultivada (Robles, 1990). Se cree que el

sorgo es originario de África Central debido a que es ahí donde se encuentra la mayor diversidad de tipos. Su distribución se le atribuye a la mano del hombre y se presume que la introducción del sorgo a América se debió por la transportación de esclavos procedentes de África por barco a comienzos del siglo XVI (FENALCE, 2010).

Actualmente el sorgo se distribuye en América desde Estados Unidos hasta al sur del continente, en Argentina. En México se ha registrado la presencia de *Sorghum bicolor* en estados del norte como Baja California, Chihuahua, Coahuila y Nuevo León; en el centro del país: Distrito federal Estado de México, Morelos, Hidalgo; hasta el sur y sureste del país como Oaxaca, Quintana Roo, Yucatán y Campeche (FENALCE, 2010; Conabio, 2012).

Requerimientos ambientales

El sorgo ha evolucionado para desarrollarse en áreas donde la temperatura es alta, esto lo hace resistente a ambientes secos. Para un buen desarrollo requiere de una temperatura entre 26 a 35 °C. Cuando se encuentra a una temperatura menor a 15.5°C presenta dificultades para su desarrollo y para la germinación de la semilla requiere una temperatura superior a 16°C (Bogdan, 1997; Ibar, 1984).

Respecto a la humedad, es una planta muy resistente a la sequía, debido a sus órganos de absorción de agua. Las raíces son largas y están sumamente ramificadas, de esta forma logran extraer agua en zonas muy profundas. Tienen muy poca transpiración debido a que presentan pocas hojas y de que están provistas en su cara superior de células que facilitan su rápido enrollado y así formar una cámara de aire húmedo para equilibrar la humedad cuando escasea el agua. Para obtener un buen rendimiento, el cultivo requiere como mínimo de humedad una precipitación de 550 a 600 mm en todo el ciclo (Ibar, 1984).

El sorgo se adapta a diferentes tipos de suelo, los mejores y en los que se obtienen mayores producciones son los francos (franco arenosos, y franco arcillosos). El sorgo requiere de suelos profundos, de un metro y medio como mínimo, debido a las largas raíces que desarrolla y deben ser suelos bien drenados, ya que el exceso de humedad es perjudicial (Ibar, 1984). También es una planta que se adapta a una amplia gama de reacciones en el suelo, se considera tolerante a un amplio rango de pH de 5.5 a 8.5 y además es semi-tolerante a la salinidad (Ibar, 1984; Vázquez, 1997).

En cuanto a la altura, el sorgo por sus exigencias de temperatura, rara vez se cultiva a más de los 1800 m; favorablemente suele cultivarse de 0 a 1000 msnm (Robles, 1990).

Se caracteriza por un fotoperiodo corto lo cual significa que la maduración de la planta se adelanta cuando el periodo luminoso es corto y el oscuro largo (Robles, 1990).

Ciclo de vida

Es una especie de crecimiento anual (Robles, 1990). Cuando se corta antes de finalizar su ciclo vegetativo da lugar a una brotación adventicia que según las situaciones ambientales, propicia un segundo corte más o menos abundante, aumentando así la producción de forraje (Juscafresa, 1980).

Al inicio de su desarrollo, la planta produce una sustancia tóxica llamada durrina, la cual es un glucósido, que al hidrolizarse en el estómago de los rumiantes, genera ácido cianhídrico, esto causa la muerte de los animales que la consuman en estado verde. A medida que la planta se desarrolla, se va perdiendo esta toxicidad, hasta desaparecer después de la floración (Juscafresa, 1980).

En casos de sequía, la planta tiene la capacidad de permanecer en un estado de latencia sin que las partes florales en desarrollo mueran, hasta que las condiciones de humedad llegan a ser favorables, continúa creciendo (Juscafresa, 1980; Robles, 1990).

Morfología

El sorgo presenta raíces adventicias, fibrosas y sumamente ramificadas. Éstas se desarrollan notablemente y profundizan en el suelo en pocas semanas, alcanzando una profundidad de 1 hasta 2 metros, con el 80% de las raíces en los primeros 30 cm. De esta forma logran extraer agua en zonas muy profundas (Ibar, 1984; Robles, 1990; Castro, 2012).

Los tallos son cilíndricos, erectos y sólidos, pueden crecer a una altura aproximadamente de 60 cm a 2 metros; en su base tiene un diámetro de 1 a 3 cm. El tallo está dividido longitudinalmente en entrenudos, cuyas uniones las forman los nudos y de éstos emergen las hojas, cada uno provisto de una yema lateral. El entrenudo es el pedúnculo más alto y porta la inflorescencia (Robles, 1990; Villarreal 2007; Castro, 2012).

Para reducir la transpiración y retener agua, poseen un número reducido de hojas, aproximadamente de 7 a 24. Las hojas maduras miden de 1.5 a 15 cm de ancho por 30 a 135 cm de longitud; aparecen alternas sobre el tallo, son lanceoladas, con una superficie superior lisa y cerosa; las vainas foliares son largas y constan de una lígula corta, membranosa (Robles, 1990; Castro, 2012).

La inflorescencia se denomina panícula, es compacta y con un raquis central. Presenta aproximadamente de 4 a 25 cm de largo, por 2 a 20 cm de ancho y puede llevar de 400 a 80000 granos (Castro, 2012). Una panícula de sorgo puede llegar a tener hasta 6000 flores y normalmente presentan autofecundación; sin embargo, existe la posibilidad de que se lleve a cabo fecundación cruzada (Robles, 1990).

La semilla es una cariósida redondeada, tiene un diámetro de 3 a 6 mm, aproximadamente, según su madurez alcanza diferentes tonalidades y colores que van

del gris, amarillo, rojo y azul. La coloración del pericarpio y testa indica la presencia de taninos (Villarreal, 2007; Castro, 2012).

Clasificación

El sorgo es una gramínea que presenta una amplia diversidad genética, es por eso que llega a ser difícil su clasificación (Shiringani, 2005).

Clasificación científica (Shiringani, 2005)

Orden: Poales

Familia: Poaceae

Subfamilia: Panicoideae

Tribu: Andropogoneae

Subtribu: Sorghiane

Género: *Sorghum*

Especie: *Sorghum bicolor* (L.) Moench

ANEXO II

Tabla 35. Cantidades de nutrimentos disponibles que aportaría el estiércol seco de vacuno, en una dosis única de 10 ton/ha, para un periodo de cuatro años considerando una serie de descomposición de 0.35, 0.15, 0.10, y 0.05.

Nutrimento	Año después de su aplicación (kg de nutrimento disponible)			
	primero	segundo	tercero	Cuarto
Nitrógeno total	52.5	14.6	8.3	3.7
Fósforo	21.0	5.9	3.3	1.5
Potasio	87.5	24.4	13.8	5.9
Calcio	112.0	31.2	17.7	7.9
Magnesio	28.0	7.8	4.4	1.9
Sodio	56.0	15.6	8.8	3.9

(SAGARPA, sin año. Recurso en línea. Fecha de consulta: 17 de noviembre del 2014).

ANEXO III

En el anexo III se cuantifica el valor, para cada uno de los índices físicos y químicos utilizados para diagnosticar y evaluar, de modo cuantitativo, la calidad del tepetate después de que éste fue expuesto a diversos tratamientos, incluyendo el cultivo de sorgo. Los valores asignados a los índices, se establecieron con base en los trabajos realizados por Vázquez (1997); USDA (1999) y Altieri and Nicholls (2002).

Se asignó a cada índice un valor de 1 a 10. En este caso, 1 es el valor menos deseable, 5 un valor moderado o medio y 10 el valor más adecuado.

Se establecieron índices de carácter físico, químico, y en su mayoría, de tipo cuantitativo. Los índices seleccionados tienen como características: (a) ser fáciles de medir e interpretar; (b) ser suficientemente sensitivos para reflejar cambios ambientales y (c) se pueden relacionar con procesos del ecosistema.

Tabla 36. Valores asignados a los índices de calidad

Índices de calidad	Descripción	valores
Agregados y estructura	Sin agregados visibles o apenas observables, que carece de estructura, siendo de grano suelto o masivo. Su consistencia es suelta en seco y extremadamente friable en húmedo.	1
	Con escasos agregados que muestran un desarrollo limitado. Los agregados se rompen al aplicar presión suave. Su estructura generalmente varía de bloques subangulares a bloques angulares y en pocas ocasiones presenta estructura granular. Su consistencia es suave en seco y muy friable en húmedo.	5
	Los agregados son comunes y claramente observables, moderadamente a bien desarrollados y mantienen la forma después de aplicar presión suave, aún humedecidos. La estructura generalmente es en bloques subangulares y granular. Es firme en seco y friable en húmedo	10
Desleimiento	De acuerdo con Herrick, (1998), el test de desleimiento ofrece un rango de estabilidad de 0 a 6. Con base en ese criterio, los valores propuestos para evaluar las clases de desleimiento presente en los horizontes y capas son los siguientes:	
	Los agregados que corresponden a clases 0 a 3 oscilan de extremadamente, a altamente inestables cuando	1

	son sumergidos en agua	
	La clase 4 muestra agregados con estabilidad moderada, pero poca resistencia estructural del agregado a permanecer intacto cuando es inmerso por más de 15 minutos	5
	Las clases 5 y 6 son respectivamente estable y muy estable a permanecer los agregados inmersos por más de 30 minutos. En las clase 5, el agregado tiende a disgregarse muy lentamente en la clase 6, permanece estructuralmente estable	10
pH	pH que oscila de <3.5 a 4.5 son típicos de suelos o materiales dísticos, caracterizados por su pobreza en bases y baja fertilidad natural para la mayoría de los cultivos. En general muestran una alta saturación de aluminio y pueden presentar deficiencias de K, Ca, Mg, P y Mo o un posible exceso de Mn. O bien, si presenta un pH que oscila de 8.2 a 9.0, el cual generalmente es indicador potencial de presencia de sodicidad, particularmente si el pH es mayor de 8.4.	1
	pH que oscila de 5.0 a 5.8, sugieren deficiencia en bases y disminución de la actividad de la biota bacteriana. Potencialmente es el umbral donde se presentan problemas con aluminio intercambiable. O bien, el pH que oscila de 7.7 a 8.1, Posible presencia de carbonatos y potencialmente posibles deficiencias de P, Fe, Zn, Mn y Cu. Cuando el pH >8.0 generalmente es indicador de un riesgo a la salinización y/o sodificación	5
	Valores de pH entre 5.9 y 7.6, se consideran que son adecuados para el crecimiento de la mayoría de los cultivos	10
Conductividad eléctrica	C.E. > de 6.07 dS/m a 25 °C, permite que solo plantas muy tolerantes se desarrollen, así como que solo unos pocos organismos halófilos se mantengan activos	1
	C.E. que oscila de 3.16 a 6.07 dS/m a 25 °C, permite que solo plantas tolerantes se desarrollen satisfactoriamente y que existan microorganismos tolerantes (hongos, actinomicetes y algunas bacterias).	5
	C.E. que fluctúa de 0 - 0.98 a <3.16 dS/m a 25 °C. Solo afecta a plantas muy sensibles a moderadamente sensibles. Es posible que en valores próximos a 3.16 dS/m se vean alterados algunos procesos microbianos como la nitrificación /denitrificación, y que sean influenciados los principales procesos microbianos (respiración/ amonificación).	10
Materia orgánica (MO %)	Porcentajes de MO que fluctúan de <0.6 a 1.2 se clasifican como extremadamente pobre y pobre.	1
	Porcentajes de MO que fluctúan de 1.21 a 1.80 y de 1.81 a 2.40 se clasifican respectivamente pobre y medio.	5
	Porcentajes de MO que fluctúan de 2.41 a 3.0 y de 3.1 a 4.2 se clasifican respectivamente como	10

	<p>medianamente rico y rico. Porcentajes de MO mayores a 4.21, se clasifican como extremadamente rico.</p>	
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	CIC que está comprendida entre <5 y 5 a 15 respectivamente se consideran como valores muy bajos y bajos.	1
	CIC que oscila entre 15 a 20 se considera media.	5
	CIC que oscila entre 20 a 40 se considera alta. CIC >40 se considera muy alta.	10
Saturación de bases (%)	Valores de SB, comprendidos entre <35 a 50% se consideran típicos de un suelo o material dístico, es decir; desbasificado, ácido y limitado en su fertilidad y productividad. Generalmente, los suelos que muestran esta saturación, presentan problemas con aluminio libre y fijación de fósforo.	1
	Valores de SB estimados en un rango de >50% a 75%, se consideran propios de suelos eútricos, es decir suelos potencialmente fértiles, capaces de sostener buena cobertura vegetal y/o cultivos, aunque requieren eventualmente de fertilización.	5
	Valores de SB estimados en >80%, típico de materiales eútricos, especialmente fértiles, si las relaciones porcentuales entre los cationes presentes, no son dinámicamente antagónicas	10
Relación Ca: Mg	Relación Ca: Mg que muestra un rango de < 3: 1. Existe el riesgo de una posible inhibición de fósforo y deficiencia de Ca	1
	Relación Ca: Mg con un rango de 1: 1, es el límite más bajo aceptable. Con valores más pequeños se reduce la disponibilidad de Ca. O bien, se presenta una relación Ca: Mg con un rango de >5: 1. En este caso, la disponibilidad de Mg se inhibe al aumentar el calcio.	5
	Relación Ca: Mg con un rango de 3: 1 – 5: 1, es óptimo para la mayoría de los cultivos	10