



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA**

**EFFECTOS DEL USO DEL FUEGO EN CAÑAVERALES SOBRE LAS PROPIEDADES
EDÁFICAS DE SUELOS TROPICALES**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE BIÓLOGA

PRESENTA

DIANA LILIA MORENO CRUZ

DIRECTOR: DR. EFRAÍN REYES ÁNGELES CERVANTES

ASESORA EXTERNA: DRA. MA. DEL CARMEN GUTIÉRREZ CASTORENA





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.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	5
2.	ANTECEDENTES	7
2.1.	Cultivo de caña de azúcar	7
2.2.	El uso del fuego en los cañaverales	8
2.3.	Propiedades hídricas del suelo	8
2.4.	Propiedades químicas del suelo	11
2.5.	Propiedades micromorfológicas y mineralógicas	13
3.	HIPÓTESIS.....	14
4.	OBJETIVOS.....	15
4.1.	Generales.....	15
4.2.	Particulares.....	15
5.	MATERIALES Y MÉTODO.....	16
5.1.	Área de estudio	16
5.2.	Selección de sitios y muestreo de suelos.....	19
5.3.	Determinación de propiedades físicas	22
5.4.	Determinación de propiedades micromorfológicas	24
5.5.	Determinación de propiedades mineralógicas.....	26
5.6.	Determinación de propiedades químicas.....	26
5.7.	Análisis estadístico	29
6.	RESULTADOS.....	30
6.1.	Propiedades físicas	30
6.2.	Propiedades hídricas.....	34
6.3.	Propiedades micromorfológicas	38
6.4.	Propiedades mineralógicas	42
6.5.	Propiedades químicas.....	45
7.	DISCUSIÓN	52
7.1.	Cosamaloapan de Carpio, Veracruz.....	52
7.2.	Tlaltizapán, Morelos.....	57
7.3.	Cultivo de caña y sustentabilidad	61
8.	CONCLUSIONES	62
9.	LITERATURA CITADA.....	63

Cuadros

	Página
1 Intervalo de K_f de acuerdo con Schoeneberger <i>et al.</i> (2002).....	9
2 Clases de infiltración según Robichaud (2000).....	9
3 Clasificación de WDPT de acuerdo con Dekker y Jungerius (1990).....	24
4 Clasificación de la acidez del suelo NOM-021-RECNAT-2000.....	27
5 Clasificación del porcentaje de materia orgánica del suelo NOM-021-RECNAT-2000.....	27
6 Clasificación de cationes intercambiables en el suelo NOM-021-RECNAT-2000.....	28
7 Clasificación de Nitrógeno inorgánico en el suelo NOM-021-RECNAT-2000.....	28
8 Clasificación de Fósforo disponible de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000.....	28
9 Propiedades físicas de los suelos de cañaverales en Cosamaloapan de Carpio, Veracruz y Tlaltizapán, Morelos y su relación con áreas no cultivadas.....	32
10 Propiedades hídricas de los suelos de cañaverales en Cosamaloapan de Carpio, Veracruz y Tlaltizapán, Morelos y su relación con áreas no cultivadas.....	35
11 Propiedades micromorfológicas de los suelos en Cosamaloapan de Carpio, Veracruz y Tlaltizapán, Morelos y su relación con áreas no cultivada.....	39
12 Propiedades químicas de los suelos en Cosamaloapan de Carpio, Veracruz y Tlaltizapán, Morelos y su relación con áreas no cultivadas.....	47

Figuras

	Página
1 Ubicación del Municipio de Cosamaloapan de Carpio.....	17
2 Ubicación del Municipio de Tlaltzapán.....	19
3 Ubicación de puntos de muestreo en Cosamaloapan de Carpio.....	20
4 Bosque Tropical Perennifolio.....	20
5 Cañaveral de 130 años.....	20
6 Bosque Tropical Caducifolio.....	21
7 Cañaveral de 400 años.....	21
8 Ubicación de puntos de muestreo en Tlaltzapán.....	22
9 Secciones delgadas.....	25
10 Image-pro Plus 6.1. Procesamiento de imágenes para cálculo de porosidad.....	26
11 Propiedades físicas del suelo de cañaverales en Cosamaloapan de Carpio y su relación con un área no cultivada.....	33
12 Propiedades físicas del suelo de cañaverales en Tlaltzapán, Morelos y su relación con un área no cultivada.....	33
13 Propiedades hídricas del suelo de cañaverales en Cosamaloapan de Carpio y su relación con un área no cultivada.....	36
14 Propiedades hídricas del suelo de cañaverales en Tlaltzapán, Morelos y su relación con un área no cultivada.....	37
15 Microfotografías del suelo de Bosque Tropical Perennifolio y cañaverales de distintas edades.....	41
16 Microfotografías de Bosque tropical caducifolio y cañaveral de 400 años.....	42
17 Mineralogía del suelo en Cosamaloapan de Carpio, Veracruz. Cultivo de caña de azúcar y su relación con un área no cultivada.....	44
18 Propiedades químicas de los suelos de cañaverales en Cosamaloapan de Carpio, Veracruz y su relación con un área no cultivada.....	49
19 Propiedades químicas de los suelos de cañaverales en Tlaltzapán, Morelos y su relación con un área no cultivada.....	51

1. INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es un cultivo con una gran demanda del cual se obtiene uno de los productos básicos de consumo para el hombre, el azúcar. Esta materia prima tiene una amplia gama de usos dentro de las actividades industriales (COVECA, 2010) y actualmente cómo biocombustible (Huang *et al.*, 2012).

La industria azucarera ha crecido rápidamente, estimulada en parte por la rentabilidad de la producción, pero principalmente por políticas gubernamentales (Huang *et al.*, 2012). En el caso de los biocombustibles, Brasil y Estados Unidos son los países que más se han dedicado a esta actividad con el objetivo de garantizar la seguridad energética como respuesta al incremento del precio de los combustibles fósiles.

En México, el cultivo de caña de azúcar cubre una superficie de 703,761 ha (SAGARPA, 2013) y existen propuestas para incrementarlo. Para regular esta expansión, nuestro país cuenta con la Ley de desarrollo sustentable de la caña de azúcar decretado por la SEMARNAT (2005). En el capítulo I, artículo 7, fracción XI enuncia las acciones de preservación del medio ambiente y la protección de la biodiversidad que deben de tener los ingenios e impulsa la ejecución de programas de recuperación ecológica.

En el Estado de Morelos este cultivo se produce desde hace 400 años (Parral, 2014); con producciones de más de 150 t ha⁻¹ (SIAP, 2014), considerados entre los más altos rendimientos del país. En contraste, en el estado de Veracruz, los ingenios azucareros datan de hace 130 años. En el primero dominan los Vertisols y en el segundo los Gleysols. Perales *et al.* (2009) indican que el manejo de suelos con cañaverales ha sido sustentable; mientras Sánchez *et al.* (2002) reportaron que el drenaje es un factor limitante en cañaverales de Veracruz. Estas contradicciones en el manejo de los suelos no están claramente establecidas en los cañaverales bajo diferentes condiciones ambientales y prolongados manejos.

Uno de los factores que puede influir positiva o negativamente sobre las propiedades del suelo es el uso del fuego a largo plazo sobre todo en sus propiedades hídricas, las cuales están directamente relacionadas con la calidad del mismo y con la salud ecológica del sistema.

Según DeBano *et al.* (1998) la reacción del suelo ante un incendio depende de la severidad de éste; a una temperatura superior a 460°C se producen cambios irreversibles en las arcillas del suelo, afectando las propiedades hídricas. Además, a 200°C se destruye la materia orgánica de manera incompleta y completa a 500°C modificando la estructura y porosidad que a su vez influyen en la tasa de infiltración de agua, así como la conductividad hidráulica y retención de humedad. Sin embargo, estos efectos son desconocidos para los suelos tropicales de México, donde el cultivo de la caña de azúcar se efectúa desde tiempos remotos.

Las interrogantes de la presente investigación son:

1. ¿El uso del fuego durante largos periodos de tiempo (hasta 400 años) ha afectado las propiedades edáficas?
2. ¿Esta afectación está relacionada con tipo de suelo y el manejo de cada uno?
3. ¿Qué propiedades determinan una mayor productividad en el Estado de Morelos comparados con el estado de Veracruz?

La respuesta a estas interrogantes permitirá contribuir al conocimiento del uso del fuego y proponer estrategias para el manejo adecuado de cañaverales en suelos tropicales y mantener sus propiedades hídricas.

2. ANTECEDENTES

2.1. Cultivo de caña de azúcar

El cultivo de caña de azúcar comienza con la preparación del terreno, que consiste en una serie de actividades que pueden realizarse con tracción mecánica, o cuando la topografía del terreno y el exceso de piedras no permiten el empleo del tractor se usa tracción animal. Las principales actividades que se llevan a cabo son:

1. Limpieza de la zona de cultivo;
2. Subsoleo, para romper las capas de suelo endurecidas de los primeros 50 cm de la superficie del suelo y así facilitar la penetración de las raíces;
3. Barbecho, que remueve la capa superficial del suelo de 25 a 30 cm, ocasionando que larvas y huevecillos de plagas queden expuestas y mueran;
4. Rastreo, reduce el tamaño de los terrones obtenidos de los barbechos;
5. Nivelación, permite darle al suelo la forma que facilite la mejor distribución del agua y
6. Surcado, que se traza en función de la pendiente del terreno (Rodríguez y Daza, 1995).

En algunos casos se eliminan el subsoleo, barbecho y rastra, incluyendo el uso de herbicidas para realizar después el surcado y la siembra (COLPOS y FUNPROVER, 2003).

En la plantación se emplean tallos de 8 a 10 meses de edad, la separación entre surcos varía de 1.35 a 1.70 m, y la distancia entre tallos es aproximadamente de 1.5 m (Viveros y Calderón, 1995). La fertilización química se lleva a cabo según los requerimientos del cultivo y del suelo, aunque básicamente se adiciona nitrógeno, fósforo y potasio (N-P-K). Otros productores incorporan además compostas a base de bagazo y cachaza, aunque no es algo frecuente. Dentro de las labores de cultivo está el deshierbe que optimiza el desarrollo de la planta y preparar el terreno para futuras fertilizaciones, riego y resiembra si hay espacios libres.

Previo a la cosecha se realizan muestreos de tallos y análisis de laboratorio dos o tres meses antes del corte para garantizar que se efectúa en el momento que la caña está madura, etapa que se alcanza alrededor de los 11 a 13 meses. En estos análisis se determina el porcentaje de humedad, grados brix, cantidad de sacarosa, pureza del jugo y azúcares reductores. Además, la cosecha puede ser manual o mecánica quemando el

cultivo lo que facilita el corte al ras de suelo; sin embargo, esta práctica tiene efectos como incidencia de malezas, descenso de la materia orgánica original del suelo, pérdida de nitrógeno, incremento de la erosión, deterioro de la fertilidad, contaminación ambiental y destrucción de biodiversidad (COLPOS y FUNPROVER, 2003).

Una vez terminada la cosecha comienza la soca, en el cual la planta retoña y comienza el ciclo nuevamente, y cuando concluye da paso al ciclo de resoca. Según las condiciones del suelo puede llevarse a cabo 2 o 3 ciclos resoca. Esto significa que el cultivo se repite hasta cinco años de manera consecutiva, después se deja descansar el suelo por un periodo de al menos un año.

2.2. El uso del fuego en los cañaverales

Previo al corte manual de la caña, se incendia el cañaveral para eliminar la mayor parte de follaje seco, así como la fauna que se establece durante el crecimiento del cultivo ya que se generan condiciones para diversas especies, dado que permanece prácticamente sin intervención durante el ciclo (Ortiz *et al.*, 2012). Por lo tanto, la quema facilita el acceso de los cortadores ya sea manual o mecánico el proceso. Una vez determinado por el ingenio que la caña esta lista para el corte, se inicia el fuego en las líneas externas del cañaveral, considerando los vientos dominantes y la temperatura ambiental. Si se encuentran cañaverales contiguos que aún no están listos para la cosecha se realizan brechas cortafuegos para evitar que este se propague. Una vez que el fuego consume la mayor parte del follaje disminuye su intensidad hasta extinguirse (CONADESUCA, 2015). Es un procedimiento cada vez menos aceptado por las comunidades que habitan cerca del área de influencia a los ingenios.

2.3. Propiedades hídricas del suelo

Conductividad hidráulica (K): Es la medida de capacidad del suelo para transmitir agua bajo un gradiente de potencial hidráulico, la conductividad hidráulica saturada (K_s) es una propiedad clave en la descripción de los procesos de infiltración y distribución de agua en el suelo (Gabriels *et al.*, 2006; Reynolds y Elrick, 1985). Esta propiedad depende fundamentalmente de la distribución y tamaño de poros, así como el grado de saturación (Luque y Peinemann, 1995). Schoeneberger *et al.* (2002) establecieron seis categorías (cuadro 1).

Cuadro 1. Intervalo de K_{fs} de acuerdo con Schoeneberger *et al.* (2002).

K_{fs}	criterio (mm h^{-1})
muy baja	< 0.036
baja	0.036 a 0.36
moderadamente baja	0.36 a 3.60
moderadamente alta	3.60 a 36.0
alta	36.0 a 360
muy alta	≥ 360

Are *et al.* (2009) reportaron que la K_{fs} puede alterarse drásticamente cuando los suelos son sometidos al fuego (de 378 mm h^{-1} a 135 mm h^{-1}) debido a que las cenizas tapan y ocasionan la reducción del volumen de los poros o por el uso intensivo del suelo o tipo de cultivo. Al respecto, Zimmermann *et al.* (2006) reportaron valores de K_{fs} de 26 y 206 mm h^{-1} para un cultivo de gramíneas contra un bosque tropical primario. Este tipo de estudios en nuestro país no se han llevado a cabo a pesar del uso de fuego y manejo intensivo, inclusive hasta de 400 años.

Infiltración: Es el proceso de entrada de agua en el suelo, es decir, la velocidad a la cual el agua se transmite a través del suelo y depende de las condiciones de la superficie (Robichaud, 2000) Este autor propone ocho clases de infiltración (cuadro 2).

Cuadro 2. Clases de infiltración según Robichaud (2000).

Clase	$\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$
Muy rápida	>508
Rápida	152.4 a 508
Moderadamente rápida	50 a 152.4
Moderada	15.24 a 50
Moderadamente lenta	5 a 15.24
Lenta	1.524 a 5
Muy lenta	0.038 a 1.524
Impermeable	< 0.038

Teague *et al.* (2010) en un pastizal después de un incendio durante 2003 y 2004, registraron valores de infiltración de 55 y 46 mm h^{-1} respectivamente, sin encontrar diferencias significativas al comparar con un área sin quemar. Por su parte, Are *et al.*

(2009) obtuvieron 672 y 240 mm h⁻¹ en un sitio de barbecho antes y después de la quema e indican que la disminución es ocasionada por la reducción de los macroporos por el depósito de las cenizas, pero no mostraron evidencias de este fenómeno. Por su parte, Zimmermann *et al.* (2006) determinaron en un bosque tropical primario una infiltración de 1533 mm h⁻¹ (disminución de 92.1%) con respecto al cultivo de gramíneas a causa de la compactación del suelo por la intensidad de uso. Estos autores no consideraron el fuego a pesar de ser un factor importante.

Potencial de flujo mátrico: Reynolds y Elrick (1985), lo definen como una medida de la capacidad del suelo para adsorber agua por fuerzas de capilaridad, a través de una unidad de sección transversal por unidad de tiempo. Esta propiedad hídrica no ha sido evaluada en cultivos de caña o suelos que sustenten alguna otra gramínea hasta el momento.

Densidad aparente: Masa del suelo seco por unidad de volumen aparente expresado en g cm⁻³ y se calcula con el volumen de las partículas y el espacio poroso (Ortiz, 2010). Ng Cheong *et al.* (2009) durante un estudio en cañaverales, determinaron que la densidad aparente incrementó de 0.96 a 1.02 g cm⁻³ en los primeros 5 cm del suelo, lo que indicó una compactación causada por el cultivo de caña. En tanto, Stoof *et al.* (2010) tamizaron y quemaron muestras de suelo obteniendo un aumento en la densidad aparente de 0.13 g cm⁻³ causado por el colapso de la estructura al someterlas al fuego. Sin embargo, Are *et al.* (2009) dicen que el fuego no ocasiona cambios ya que en un barbecho antes y después de un incendio la densidad fue de 1.23 y 1.24 g cm⁻³ sin diferencias significativas.

Hidrofobicidad: Este fenómeno se ha reportado en suelos bajo condiciones naturales y es ocasionado por la presencia de compuestos orgánicos hidrofóbicos generados por plantas o por la fauna del suelo. También puede ser producido por contaminación de hidrocarburos, calentamientos e incendios lo cual afecta la infiltración e incrementa la escorrentía y la erosión (Jaramillo 2006; Tessler *et al.*, 2008). DeBano (1998) estudió la influencia del fuego en la hidrofobicidad y encontró que cuando el suelo alcanza una temperatura de 176°C hay cambios menores en la repelencia de agua, entre 176° y 204°C se forma una alta repelencia, y a 288°C esta propiedad desaparece por completo.

Glenn y Finley (2010), durante un estudio realizado en un pastizal afectado por incendios en 2005, encontraron que el suelo presentaba repelencia al agua en la superficie y a 2 cm de profundidad; sin embargo, se desconoce la temperatura que alcanzó el incendio.

Contenido de humedad: Es una propiedad de vital importancia para conocer la relación suelo-agua, ya que afecta directamente la infiltración, el flujo de agua, el transporte de solutos y la disponibilidad de agua para las plantas (Domingo *et al.*, 2006).

En esta línea de investigación, Are *et al.* (2009) analizaron el contenido de humedad en los primeros 15 cm del suelo y obtuvieron 10.7 y 8.7 % para antes y después de un incendio, sin mostrar diferencias significativas; no obstante, estos autores no indican la intensidad del fuego y el tiempo que duró el incendio.

En México, los estudios sobre cómo afecta el fuego las propiedades hídricas son muy pocos. Ángeles (2010), en un estudio realizado en bosque de oyamel concluyó que los cambios ocasionados por el fuego severo favorecen la retención de humedad, la agregación y la porosidad del suelo; mientras que el incendio superficial colapsa los agregados disminuyendo el porcentaje de humedad relativa, porosidad total, infiltración y conductividad hidráulica. Esta última fue la propiedad más afectada en 99.9% ya que pasó de 0.489 a 0.0005 mm h⁻¹.

2.4. Propiedades químicas del suelo

pH: Esta propiedad tiene un efecto importante en el desarrollo de los seres vivos. La intensidad se determina midiendo la concentración de iones hidrógeno activos (H⁺) que se encuentran en la interface líquida del suelo (Zapata, 2004). Fernández (2006) explica que la concentración de iones hidrógeno es fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo. Los estudios relacionados entre el pH y el cultivo de caña han sido llevados a cabo por Bangita *et al.* (2012) quienes encontraron un valor de pH de 6.33 en un cañaveral en Nueva Guinea, de igual manera Hartemink (1998) reportó un valor de pH de 6.2 en los primeros 15 cm del suelo.

Capacidad de intercambio catiónico: Se define como la capacidad total de los coloides del suelo (arcilla y materia orgánica) para intercambiar cationes con la solución del mismo. Esta capacidad se ve influenciada por factores como temperatura, presión,

composición de la fase líquida y la relación masa de suelo/solución (Jordán, 2005). Mardamootoo *et al.* (2013) reportaron 10.0, 5.9, 14.0 y 4.9 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ en distintos tipos de suelo de un cañaveral (Nitosol Húmico, Acrisol Húmico, Cambisol Eútrico y Cambisol Dístrico respectivamente). Bangita *et al.* (2012) para un cultivo de caña determinaron 40.0 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$, sin hacer énfasis en el tipo de suelo.

Materia orgánica: Constituye un sistema complejo y heterogéneo y con una dinámica propia e integrada por diversos grupos de sustancias. La materia orgánica del suelo se compone de vegetales, animales y microorganismos vivos, sus restos, y las sustancias resultantes de su degradación físico-química (Jordán, 2005). Are *et al.* (2009) encontraron porcentajes de MO de 10.7 y 8.7 antes y después de un incendio, valores no significativos. Por su parte, Mardamootoo *et al.* (2013) en un cultivo de caña obtuvieron 4.2, 5.3, 5.4 y 7.0 % para distintos tipos de suelo.

Nitrógeno total: Fernández (2006) define que el nitrógeno es un nutrimento esencial para los seres vivos ya que es uno de los constituyentes principales de compuestos vitales como aminoácidos, proteínas, enzimas, nucleoproteínas, ácidos nucleicos, así como también de las paredes celulares y clorofila en los vegetales. En un cultivo de caña Bangita *et al.* (2012) encontraron concentraciones de 1.93 g kg^{-1} .

Fósforo: Macronutriente esencial para plantas y microorganismos por lo que puede ser un factor limitante. Se encuentra como componente de ácidos nucleicos fosfolípidos. En un fluvisol, Hartemink (1998) mencionó un valor promedio de 25 mg kg^{-1} en los primeros 15 cm del suelo, afirmando que es un nivel alto para cultivo de caña.

2.5. Propiedades micromorfológicas y mineralógicas

La micromorfología describe e interpreta los componentes, rasgos y fábricas de los suelos a nivel microscópico, los cuales están determinados por procesos naturales o por la acción del hombre (Gutiérrez y Ortiz, 1999). Esta disciplina tiene como principio básico utilizar muestras inalteradas de suelos donde es posible observar la estructura, sus componentes y el grado de perturbación de un área específica (Bullock *et al.*, 1999) y en consecuencia comprender los procesos que han ocurrido en el suelo.

Por otro lado, los efectos del fuego en el suelo dependen de la mineralogía de este, así como de la temperatura que alcance; ya que entre los 350-450°C se modifica la porosidad, y a una temperatura superior la fragmentación de los agregados y la actividad biológica derivan en una estructura granular. Además, tanto los componentes naturales como los adicionados al suelo pueden modificarse durante la quema y aunado a largos periodos de manejo se presentan cambios significativos en la textura y los horizontes del suelo (Giovannini *et al.*, 1990).

La porosidad está relacionada con los espacios vacíos del suelo. Ortiz (2010) explica que los poros están asociados con el arreglo de los componentes primarios, los patrones de enraizamiento, madrigueras de animales y demás procesos de formación del suelo. Lipiec *et al.* (2009), encontraron diferencias significativas al evaluar el efecto de la labranza sobre el porcentaje de porosidad en los primeros 5 cm de suelo debido a la compactación que redujo el espacio poroso. Sin embargo, Are *et al.* (2009) evaluaron la porosidad total antes y después de un incendio y obtuvieron 54.2 y 53.5 % sin diferencias significativas. Por otra parte, los estudios en micromorfología y mineralogía en Gleysols y Vertisols son escasos.

Los estudios realizados en cañaverales citados en el presente trabajo evalúan las propiedades hídricas, físicas y químicas; y poco o nada se sabe de su efecto sobre las propiedades micromorfológicas y mineralógicas. No se encontraron publicaciones que evalúen la acción del fuego sobre las propiedades hídricas, micromorfológicas y químicas del suelo por periodos de tiempo prolongados.

3. HIPÓTESIS

1. El fuego en los suelos cañaverales ha modificado las propiedades edáficas en comparación con los suelos nativos.
2. Los cambios más drásticos en las propiedades edáficas ocurren a mayor tiempo de manejo en los cañaverales.
3. Si los suelos en los cultivos de caña presentan hidrofobicidad es indicativo que alcanzan temperaturas entre los 176 y 204°C, por lo que la infiltración y la conductividad hidráulica se ven afectadas.
4. Los cañaverales de mayor edad presentarán menor porcentaje de macro y meso poros y valores bajos en las propiedades hídricas.

4. OBJETIVOS

4.1. Generales

- Evaluar el efecto del uso continuo de fuego con diferentes tiempos de manejo sobre las propiedades edáficas de cañaverales.

4.2. Particulares

- Comparar las propiedades edáficas determinadas en la vegetación original y de cañaverales contiguos.
- Evaluar el efecto del fuego sobre las propiedades edáficas de cañaverales de distintas edades: 14, 35, 130 y 400 años.
- Determinar la hidrofobicidad y severidad de esta propiedad en los cañaverales de distintas edades y regiones.
- Determinar las propiedades edáficas que expliquen los altos rendimientos del estado de Morelos, en contraste con los cañaverales del estado de Veracruz.

5. MATERIALES Y MÉTODO

5.1. Área de estudio

5.1.1. Sitio "A" Cosamaloapan de Carpio, Veracruz

El municipio de Cosamaloapan de Carpio, en el estado de Veracruz, se localiza entre los paralelos 18° 08' y 18° 26' de latitud norte y los meridianos 95° 46' y 96° 12' de longitud oeste; a una altitud entre 5 y 20 msnm (figura1). Ocupa 0.72% de la superficie del estado.

Clima: Cuenta con un clima Aw, cálido subhúmedo con lluvias en verano (García, 1973), temperatura de 24 a 28°C y precipitación de 1400 a 2100 mm.

Fisiografía: Pertenece a la provincia de la Llanura Costera del Golfo Sur, subprovincia de la Llanura costera Veracruzana. Las topofomas presentes son llanuras aluviales con lomerío (cuenta con una extensión del 83%) y llanuras aluviales costeras inundables (con 17% de extensión).

Geología: principalmente roca sedimentaria.

Edafología: De acuerdo con el INEGI (2009), se localizan los siguientes tipos de suelos en el área de estudio Gleysols, Calcisols, Vertisols y Feozems. La Base de Referencia Mundial (WRB 2014) reporta las siguientes características para estos suelos:

Gleysols: (17%), proviene de la palabra rusa gley que significa masa lodosa; se caracterizan por presentar signos claros de influencia de agua freática. Se forman a partir de un amplio rango de materiales no consolidados, principalmente fluviales, marinos y lacustres del Pleistoceno u Holoceno, con mineralogía básica a ácida.

Calcisols: (14%), del latín *calx*, calcáreo; son suelos que presentan una acumulación sustancial de carbonatos de calcio secundarios, se forman a partir de materiales parentales principalmente de depósitos aluviales, coluviales y eólicos de material meteorizado rico en bases.

Phaeozems: (6%), del griego *phaios*, oscuro, y ruso *zemlja*; son suelos oscuros ricos en materia orgánica; el material parental es no consolidado de origen eólico o glacial entre otros y predominantemente básicos.

Fisiografía es muy compleja ya que pertenece a la provincia de la Sierra Madre del Sur, subprovincia de las sierras y valles Guerrerenses, sierra de laderas escarpadas (36.81%), valle de laderas tendidas con lomerío (23.23%), llanura aluvial con lomerío (21.17%), lomerío típico (17.25%) y meseta de aluvión antiguo con cañadas (1.54%).

Geología: Roca sedimentaria e ígnea extrusiva.

Edafología: En el área de estudio ocurren Regosols, Kastañozems Vertisols principalmente, pero también se pueden encontrar asociaciones de Leptosols y Feozems (INEGI (2009). El Grupo de Trabajo de la WRB (2014) los describe de la siguiente manera:

Regosols: (16.83%), del griego rhegos, manta; son suelos débilmente desarrollados de material parental no consolidado de grano fino.

Kastañozems: (12.26%), del latín *castanea*, ruso *kashtan*, castaña, y *zemlja*, tierra. Son suelos pardos oscuros ricos en materia orgánica, el material parental de origen no consolidado.

Leptosols; (31.19%), del griego leptos, fino; suelos someros; con material parental: de varios tipos de roca continua o de materiales no consolidados con menos de 20 % (en volumen) de tierra fina.

Vertisols (28.8%) y Phaeozems (5.51%).

Vegetación: Selva (42.29%) y pastizal (3.08%).

Uso de Suelo: Pertenece a la región hidrológica del Balsas, el 49.22% está destinado a la agricultura, la zona urbana cuenta con 5.41% del territorio.

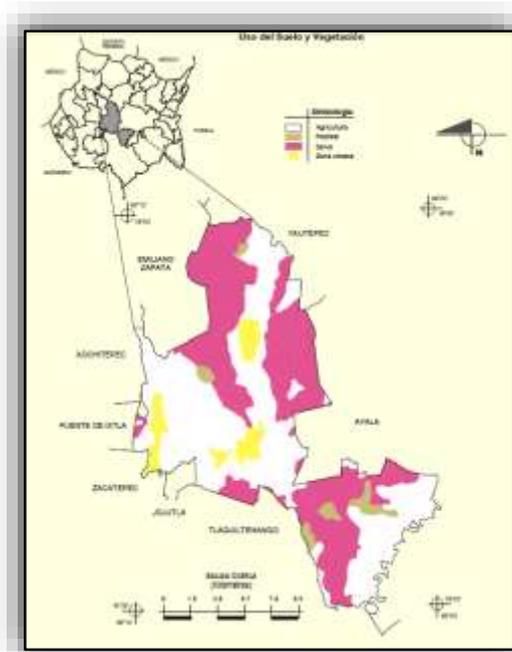


Figura 2. Ubicación del Municipio de Tlaltizapán.

5.2. Selección de sitios y muestreo de suelos

En Cosamaloapan de Carpio, Veracruz se seleccionaron los sitios después de una entrevista con el Señor Felipe Segundo Ochoa, originario de la zona y dueño de las parcelas a las cuales nos dirigió, distinguiendo entre ellas por edades (14, 35 y 130 años). Asimismo, a un área que no ha sido cultivada y conserva su vegetación original (figura 3). Los suelos presentes en estos cañaverales son clasificados por el Grupo de Trabajo de la WRB (2014) como Gleysols, se caracterizan por la saturación de agua freática durante periodos largos, por lo que desarrollan un *patrón de color gléyico*; presentan una mineralogía básica a ácida y se ubican en depresiones y áreas bajas del paisaje. Es posible encontrarlos en casi todos los climas alrededor del mundo y el principal obstáculo para su manejo es el drenaje del agua freática.



Figura 3. Ubicación de puntos de muestreo en Cosamaloapan de Carpio.



Figura 4. Bosque Tropical Perennifolio.



Figura 5. Cañaveral de 130 años.

En el municipio de Tlaltizapán, Morelos, el planificador para el desarrollo agropecuario, Sr. Alfredo permitió realizar las pruebas en una de sus parcelas con edad de 400 años, también indicó un sitio con vegetación original para comparar con el cañaveral (figura 8).

De acuerdo con la WRB (2014), los suelos presentes en el área de estudio se clasifican como Vertisols, los cuales son muy arcillosos, se mezclan y contienen alta proporción de arcillas expandibles. Cuando se secan forman grietas anchas desde la superficie hacia abajo. Es común encontrarlos en climas tropicales y subtropicales, tienen un amplio uso y alto potencial agrícola que depende de un adecuado manejo.



Figura 6. Bosque Tropical Caducifolio.



Figura 7. Cañaveral de 400 años.



Figura 8. Ubicación de puntos de muestreo en Tlaltizapán.

5.3. Determinación de propiedades físicas

En cada uno de los sitios se realizaron tres registros de conductividad hidráulica saturada (K_{fs}), infiltración y potencial de flujo mátrico (Φ_m) con el permeámetro de Guelph modelo 2800KI; el cual hace uso del principio de Mariotte. Siguiendo la metodología descrita por Gabriels (2006), se usó una barrena para formar un agujero de aproximadamente 6 cm de diámetro y 10 cm de profundidad en el cual se colocó el permeámetro y se ajustó la válvula del reservorio. Posteriormente, se niveló el agua a 5 cm y la velocidad de descenso se registró por medio de una escala graduada en intervalos constantes de tiempo. Cuando la velocidad de descenso se volvió constante se obtuvo R1, posteriormente, para obtener R2 se niveló el agua a 10 cm y se repitió la operación.

Tasa de infiltración:

$$Inf = \frac{L1 - L2}{t} = \frac{cm}{min}$$

Dónde:

L1 = lectura inicial

L2 = lectura final

t = tiempo en minutos

Conductividad hidráulica saturada de campo (k_{fs}).

$$K_{fs} = [(a)(constante\ del\ reservorio)(R2')] - [(b)(constante\ del\ reservorio)(R1')]$$

Dónde:

$a = 0.0041$

$b = 0.0054$

$R1' = R1/60 = cm\ seg^{-1}$

$R2' = R2/60 = cm\ seg^{-1}$

Potencial de flujo mátrico (Φ_m):

$$\Phi_m = [(c)(constante\ del\ reservorio)(R1')] - [(d)(constante\ del\ reservorio)(R2')]$$

Dónde:

$c = 0.0572$

$d = 0.0237$

$R1' = R1/60 = cm\ seg^{-1}$

$R2' = R2/60 = cm\ seg^{-1}$

Densidad aparente (dap). Se determinó por el método del cilindro. Las muestras colectadas se secaron en laboratorio en un horno a 70°C y se registró la lectura de su peso cada 24 horas hasta ser constante (Flores y Alcalá, 2010), para después aplicar la siguiente fórmula:

Densidad Aparente (dap):

$$(\text{g cm}^{-3}) = \frac{\text{masa del suelo seco}}{\text{volumen total del suelo}}$$

Hidrofobicidad. De acuerdo con la metodología de WDPT (water drop penetration time) se colocó una gota de agua en la superficie del suelo y se contabilizó el tiempo que tardó en penetrar completamente, se clasificó con lo propuesto por Dekker y Jungerius (1990) como se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 3. Clasificación de WDPT de acuerdo con Dekker y Jungerius (1990).

Clase de persistencia	Nivel de persistencia de la repelencia al agua	Valores de WDPT (s)
0	No repelente	< 5
1	Ligeramente repelente	5 – 60
2	Fuertemente repelente	60 – 600
3	Severamente repelente	600 – 3600
4	Extremadamente repelente	> 3600

Porcentaje de humedad. se obtuvo por el método Gravimétrico, el cual consiste en colocar una muestra de suelo húmedo para secar a la estufa a 105°C hasta peso constante (Ortiz, 2010), posteriormente se aplicó la fórmula:

Porcentaje de humedad (%):

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{\text{peso del suelo húmedo} - \text{peso del suelo seco al horno}}{\text{peso del suelo seco al horno}} \times 100$$

5.4. Determinación de propiedades micromorfológicas

Para la evaluación de la estructura, tamaño, tipo y distribución de poros se colectaron muestras inalteradas de suelo con cajas tipo Kubiena, enterrándolas de manera vertical en el suelo y excavando alrededor de ellas para extraerlas evitando alterar la muestra. Posteriormente, fueron trasladadas al laboratorio de Génesis y Clasificación de Suelos en el Colegio de Postgraduados.

Los bloques fueron secados a la sombra e impregnados con resina poliéster insaturado y monómero estireno (relación 1:12) y 1.5 ml de peróxido de metil-etil-cetona como catalizador. Enseguida se metieron a una caja de vacío durante 3 horas, si después de ese tiempo el nivel de resina había disminuido se adicionó más y se sometió a vacío nuevamente. Posteriormente, las muestras se dejaron en reposo para que endureciera la resina. Una vez solidificado el bloque se cortaron secciones de 7 por 5 cm con un disco de punta diamante y se pegaron a un portaobjetos. Las secciones delgadas se pulieron hasta 30 μm de espesor utilizando diferentes abrasivos para después ser cubiertos con un portaobjetos.

Los componentes del suelo (estructura, porosidad, materia orgánica y masa basal) se describieron utilizando los manuales propuestos por Bullock *et al.* (1999), utilizando un microscopio petrográfico marca Olympus BX51.

La cuantificación de la porosidad del suelo requirió del programa de cómputo Image-Pro Plus 6.1. Se tomaron 6 fotografías (a 2x y 4x).de manera sistemática en las secciones delgadas.

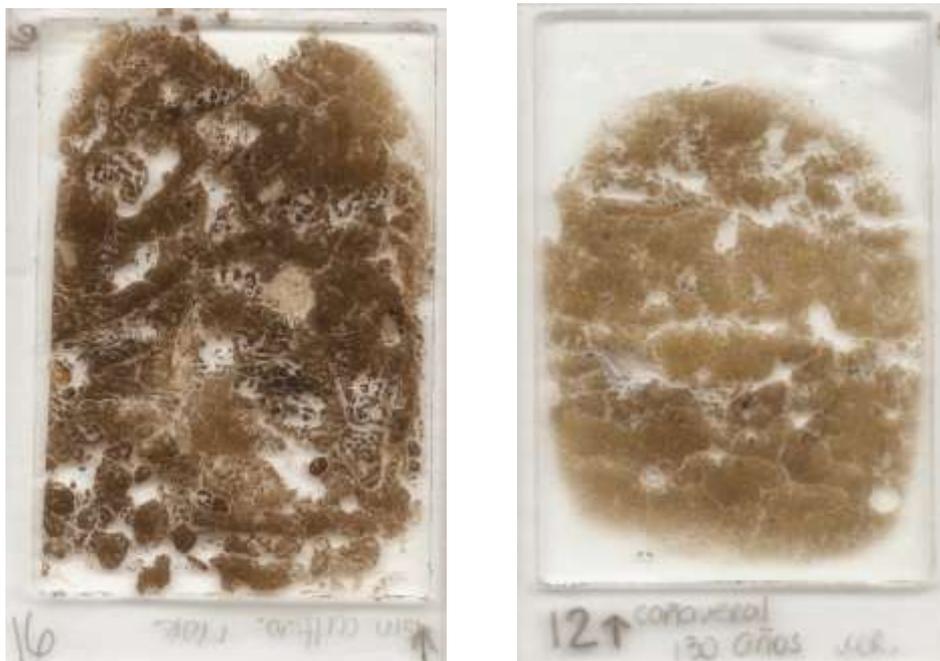


Figura 9. Secciones delgadas. Izquierda Bosque tropical Caducifolio, derecha Cañaveral de 130 años

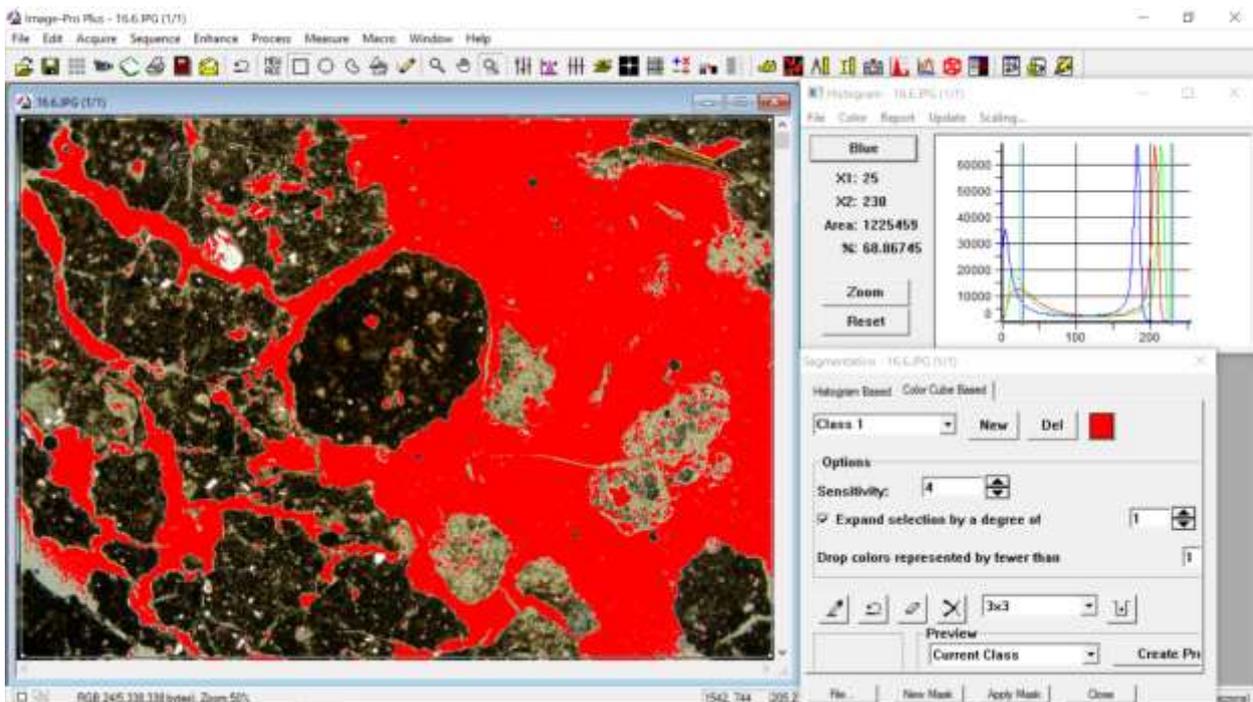


Figura 10. Image-pro Plus 6.1. Procesamiento de imágenes para cálculo de porosidad.

5.5. Determinación de propiedades mineralógicas

Muestras representativas de los Gleysols de Cosamaloapan se seleccionaron, posteriormente se molieron utilizando un mortero de ágata para obtener una muestra más fina (50 μm) y se colocaron en un portamuestras. Estas muestras fueron analizadas en un Difractómetro de Rayos X, (GB) de 2 a 60 grados. Los minerales fueron identificados usando las ocho principales reflexiones utilizando la base de datos Mineral Powder Diffraction File (2002).

5.6. Determinación de propiedades químicas

Las muestras de suelo fueron secadas a temperatura ambiente, para posteriormente tamizar con una malla de 2 mm y separar la fracción fina del suelo. Las propiedades edáficas que se determinaron fueron: pH (relación 1:2 suelo:agua), materia orgánica (método de Walkley y Black), cationes intercambiables (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) con el método de acetato de amonio; nitrógeno total mediante el método micro-Kjeldhal, y fósforo disponible (método de Olsen). Todas estas metodologías se extrajeron del

manual de procedimientos de Van Reeuwijk (1999). La interpretación de estas propiedades se realizó de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000.

pH: Método electrométrico, basado en la determinación de la actividad del ion H⁺ mediante el uso de un electrodo cuya membrana es sensitiva al hidrógeno. El pH se mide potenciométricamente en la suspensión sobrenadante de una mezcla de relación suelo:agua 1:2. También se determinó el grado de acidez o basicidad de acuerdo con lo establecido en el cuadro 4..

Cuadro 4. Clasificación de la acidez del suelo de acuerdo a la NOM-021- SEMARNAT -2000.

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1 – 6.5
Neutro	6.6 – 7.3
Medianamente alcalino	7.4 – 8.5
Fuertemente alcalino	> 8.5

Materia orgánica: El fundamento del método se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo, por medio de una disolución de dicromato de potasio, y el calor de reacción que se genera al mezclar con ácido sulfúrico concentrado.

Cuadro 5. Clasificación del porcentaje de materia orgánica del suelo de acuerdo a la NOM-021- SEMARNAT-2000.

%Materia orgánica	
Clase	Suelos no volcánicos
Muy bajo	< 0.5
Bajo	0.6 – 1.5
Medio	1.6 – 3.5
Alto	3.6 – 6.0
Muy alto	> 6.0

Cationes intercambiables: El método consiste en la saturación de la superficie de intercambio por el ion amonio; posteriormente, el lavado del exceso de sales por medio de saturación con alcohol y destilación para determinar el amoniaco solubilizado. La interpretación de los resultados se realizó con base en la NOM-021-SEMARNAT-2000 con el siguiente cuadro.

Cuadro 6. Clasificación de cationes intercambiables en el suelo de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Clase	Ca	Mg Cmol (+) kg⁻¹	K
Muy baja	< 2	< 0.5	< 0.2
Baja	2 – 5	0.5 – 1.3	0.2 – 0.3
Media	5 – 10	1.3 – 3.0	0.3 – 0.6
Alta	> 10	> 3.0	> 0.6

Nitrógeno: Se determina por el procedimiento micro-Kjeldhal. Se basa en la extracción de amonio intercambiable por equilibrio de la muestra de suelo con KCl y su determinación por destilación por arrastre de vapor en presencia de MgO.

Cuadro 7. Clasificación de Nitrógeno inorgánico en el suelo de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Clase	Nitrógeno inorgánico en el suelo mg kg⁻¹
Muy bajo	0 – 10
Bajo	10 – 20
Medio	20 – 40
Alto	40 – 60
Muy alto	> 60

Fósforo disponible: Para suelos neutros y alcalinos se siguió el método de Olsen. Los resultados del análisis se interpretaron con forme al siguiente cuadro.

Cuadro 8. Clasificación de fósforo disponible de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Fósforo	
Clase	mg Kg⁻¹
Bajo	< 5.5
Medio	5.5 – 11
Alto	> 11

5.7. Análisis estadístico

Los resultados de los análisis realizados se incluyeron en una base de datos para una prueba t-student y así detectar diferencias significativas al 0.05%. Para relacionar las variables con la edad del cañaveral se efectuó una regresión múltiple. Estos análisis se llevaron a cabo con el programa Stata.

6. RESULTADOS

6.1. Propiedades físicas

En el Cuadro 9 se reportan las propiedades físicas de las zonas de estudio. A continuación, se describen éstas propiedades.

Densidad aparente (*dap*). En Veracruz, el bosque tropical perennifolio (BTP) presentó una densidad aparente de $1.16 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Las quemas continuas en los cañaverales generaron un incremento ligero de la densidad aparente en los primeros 35 años (1.28 y $1.27 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, respectivamente); no obstante, para los 130 años la densidad aparente presenta valores similares a los suelos con vegetación de bosque. Esos cambios no son estadísticamente significativos.

En los suelos del estado de Morelos, que todavía sustentan Bosque Tropical Caducifolio (BTC) y los cañaverales con 400 años de quema, presentan una *dap* de $0.99 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ y $0.94 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ respectivamente. Esto significa que las quemas no modificaron esta propiedad.

Porcentaje de humedad. El BTP presenta un porcentaje de humedad de 26.14% y tiende a disminuir conforme se aumentan los años de cultivo hasta 15.49% en el caso de 130 años.

En los suelos del estado de Morelos, esta propiedad también disminuye con el cambio de uso del suelo y la prolongación de la práctica agrícola. Después de 400 años de quemas continuas en el cañaveral de Tlaltzapán (29.32%) disminuyó 25% con respecto a BTC; sin embargo, estadísticamente no representa un cambio significativo.

Espacio poroso calculado. Los suelos de cañaverales en Cosamaloapan presentaron valores de porosidad elevados de hasta 55.06% en el caso de C130 y no se observan cambios drásticos al compararlos con BTP. De igual manera, BTC presentó valores de porosidad de hasta 64%, valor que no se ve afectado incluso con 400 años de cultivo. Estos valores muestran correspondencia con la densidad aparente.

Estructura. BTP mostró estructuras granulares y bloques subangulares con un desarrollo débil a moderado, poca actividad biológica representada por canales y excrementos, predominan los poros fisura, aunque se observan cavidades, además de restos de tejidos vegetales, El uso de fuego en los cañaverales y el manejo a diferentes tiempos (14, 35 y 130 años) disminuye la frecuencia de la estructura granular y aumenta la formación de poros fisura. La actividad biológica se mantiene.

El BTC se caracterizó por una estructura granular de moderado a fuerte desarrollo, alta actividad biológica (presencia de rellenos, excrementos y canales), así como un sistema de poros de empaquetamiento compuesto. Este tipo de estructura (de origen biológico) ocurren en cañaverales de 400 años de manejo, e incluso hay una elevada actividad de lombrices por la alta ocurrencia de poros canales aleatorios, además de restos carbonizados.

Hidrofobicidad. En Veracruz, los suelos del bosque no presentan hidrofobicidad (la gota de agua se absorbió al contacto). Las quemadas en C14 y C35 no generaron repelencia al agua, únicamente el cañaveral de 130 años se clasificó como fuertemente repelente (tiempo medio de penetración de la gota de 90 s).

Para el caso de Morelos, a pesar de 400 años de quemadas continuas el cañaveral no presentó hidrofobicidad de igual manera que el BTC.

Cuadro 9. Propiedades físicas de los suelos de cañaverales en Cosamaloapan de Carpio, Veracruz (sitio a) y Tlaltizapán, Morelos (sitio b) y su relación con áreas no cultivadas. Bosque tropical perennifolio (BTP), cañaveral de 14 años (C14), cañaveral de 35 años (C35), cañaveral de 130 años (C130) en Cosamaloapan de Carpio. Bosque tropical caducifolio (BTC) y cañaveral de 400 años (C400) en Tlaltizapán, Morelos. Las letras diferentes indican diferencias significativas ($\alpha=0.05$).

Sistema	Porcentaje de humedad (%)	Densidad aparente (g cm^{-3})	Espacio poroso calculado (%)	Estructura	Hidrofobicidad (seg)	Textura
Sitio a						
BTP	26.14 \pm 5.89 ^a	1.16 \pm 0.19 ^a	56.22 ^a	Granular, bloques subangulares	0	Franco limoso
C14	25.62 \pm 2.38 ^a	1.28 \pm 0.19 ^a	51.69 ^a	Bloques subangulares	4 \pm 0	Franco limoso
C35	25.51 \pm 5.05 ^a	1.27 \pm 0.09 ^a	52.07 ^a	Bloques subangulares	0	Franco limoso
C130	15.49 \pm 2.48 ^b	1.19 \pm 0.13 ^a	55.09 ^a	Bloques subangulares	90.33 \pm 26.40	Franco arcillo limoso
Sitio b						
BTC	38.67 \pm 11.25 ^a	0.94 \pm 0.13 ^a	64.52 ^a	Granular	0	Franco arcillo limoso
C400	29.32 \pm 4.92 ^a	0.99 \pm 0.04 ^a	62.64 ^a	Granular	0	Franco arcillo limoso

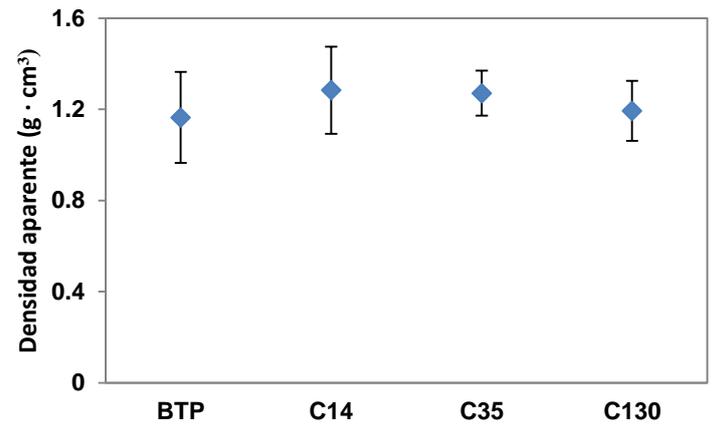
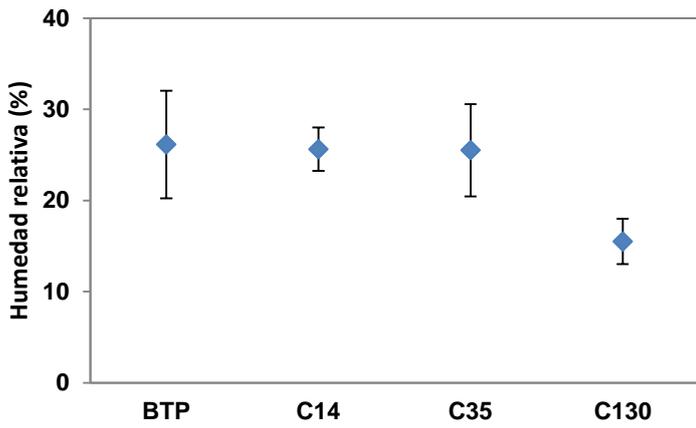


Figura 11. Propiedades físicas del suelo de cañaverales en Cosamaloapan de Carpio y su relación con un área no cultivada. Bosque tropical perennifolio (BTP), cañaveral de 14 años (C14); cañaveral de 35 años (C35); cañaveral de 130 años (C130).

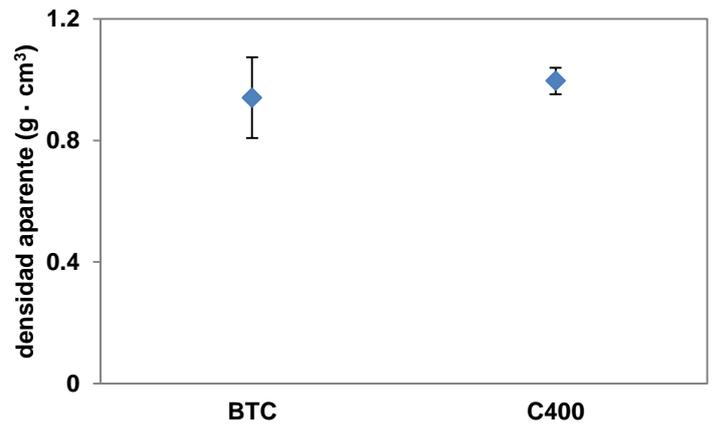
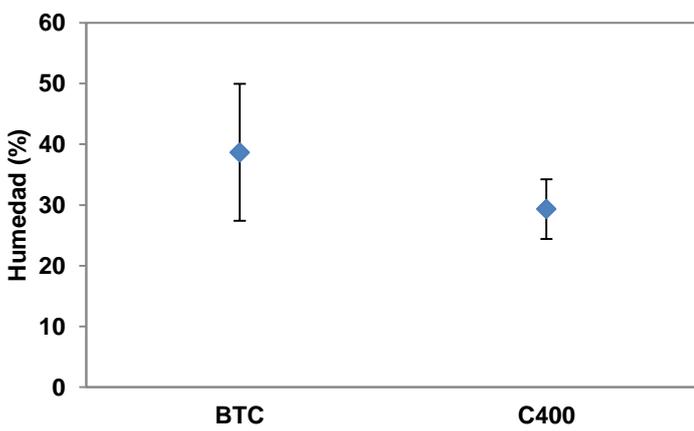


Figura 12. Propiedades físicas del suelo de cañaverales en Tlaltizapán, Morelos y su relación con un área no cultivada. Bosque tropical caducifolio (BTC) y cañaveral de 400 años (C400).

6.2. Propiedades hídricas

Infiltración. Para BTP en Veracruz se obtuvo una infiltración superficial de $325.55 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. No obstante, las quemas en los cañaverales incrementaron la infiltración superficial hasta 953, y $33000 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ a los 14 y 35 años respectivamente, por lo que se clasifican como muy rápidos de acuerdo con lo establecido por Robichaud (2000). La continua quema por tiempos más prolongados (130 años) genera una reducción drástica de esta propiedad, hasta $280 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$; empero, sigue siendo rápido (Robichaud, 2000).

En el estado de Morelos, el BTC presentó una infiltración superficial de $4050 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. Las quemas durante 400 años no afectaron la infiltración en este cañaveral ya que el valor registrado fue de $4759.2 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$; ambos sitios tienen una infiltración muy rápida.

Conductividad hidráulica (K_{fs}). El bosque tropical perennifolio (BTP) presentó un valor de $24 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. Esta propiedad aumentó en C14 y C35 hasta 60.27, y $2104.15 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ siendo estos valores altos y muy altos respectivamente de acuerdo con Schoeneberger *et al.* (2002). Con el tiempo, ésta propiedad vuelve a llegar a los mismos valores iniciales, pues en cañaverales de 130 años la conductividad fue de $37.89 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$.

En BTC la K_{fs} se registró con un valor de $474.59 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ y en C400 se obtuvo una conductividad hidráulica de $626.37 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, lo cual no representa un cambio significativo y son valores muy altos de K_{fs} (Schoeneberger *et al.*, 2002) a pesar de las quemas por 400 años.

Potencial de flujo mátrico (Φ_m). Esta propiedad en BTP resultó de $-0.003 \text{ cm}^2\cdot\text{seg}^{-1}$, lo que indica que el suelo tiene una baja capacidad para adsorber agua. Para los cultivos de 14, 35 y 130 años los valores fueron de 0.0006, 0.017 y $-0.005 \text{ cm}^2\cdot\text{seg}^{-1}$, respectivamente.

En BTC se presentó un valor de $-0.06 \text{ cm}^2\cdot\text{seg}^{-1}$; mientras que el cañaveral de 400 años $-0.09 \text{ cm}^2\cdot\text{seg}^{-1}$.

Cuadro 10. Propiedades hídricas de los suelos de cañaverales en Cosamaloapan de Carpio, Veracruz (sitio a) y Tlaltizapán, Morelos (sitio b). Cultivo de caña de azúcar y su relación con un área no cultivada. Bosque tropical perennifolio (BTP), cañaveral de 14 años (C14), cañaveral de 35 años (C35), cañaveral de 130 años (C130) en Cosamaloapan de Carpio. Bosque tropical caducifolio (BTC) y cañaveral de 400 años (C400) en Tlaltizapán, Morelos.

Sistema	Infiltración		Conductividad Hidráulica (mm h ⁻¹)	Potencial de flujo mátrico (cm ² seg ⁻¹)
	Superficial (mm h ⁻¹)	5 cm		
Sitio a				
BTP	325.55 ± 99.78 ^a	85.2 ± 118.56 ^a	24.49 ± 33.80 ^a	-0.003 ± 0.00 ^a
C14	953 ± 1357.10 ^a	406.66 ± 583.20 ^a	60.27 ± 85.06 ^a	0.0006 ± 0.00 ^b
C35	33000 ± 17482.56 ^b	13992 ± 10194.12 ^b	2104.15 ± 1958.81 ^b	0.017 ± 0.43 ^b
C130	280 ± 91.65 ^a	13.33 ± 23.62 ^a	37.89 ± 9.53 ^a	-0.005 ± 0.00 ^a
Sitio b				
BTC	4050 ± 5854.15 ^a	579.6 ± 458.38 ^a	474.59 ± 761.89 ^a	-0.06 ± 0.11 ^a
C400	4759.2 ± 4375.52 ^a	320 ± 192.87 ^a	626.37 ± 662.45 ^a	-0.09 ± 0.11 ^a

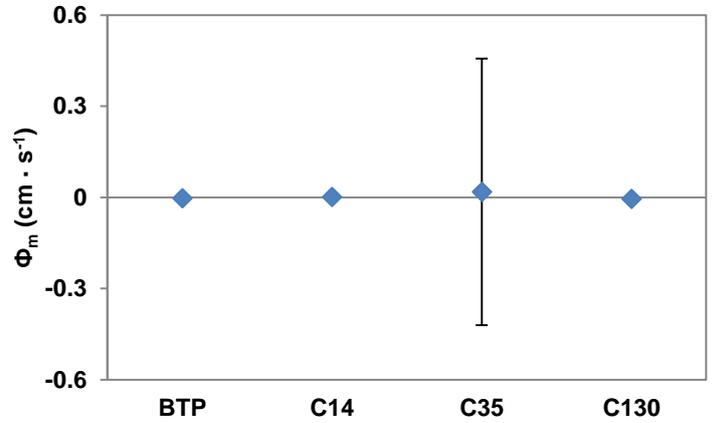
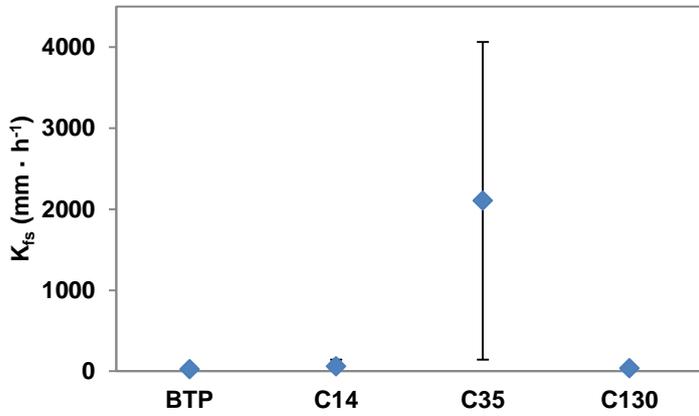
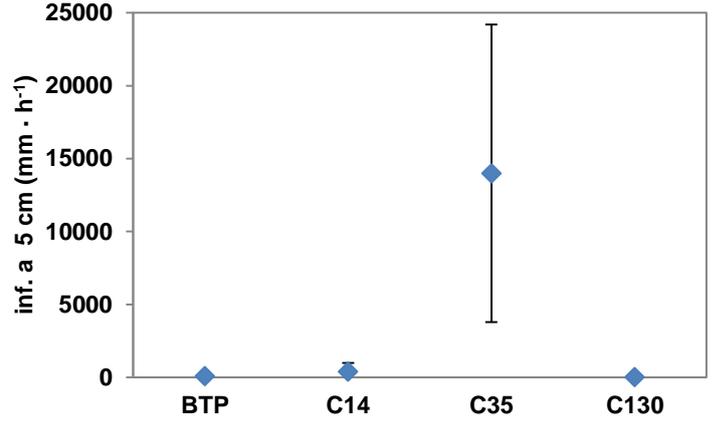
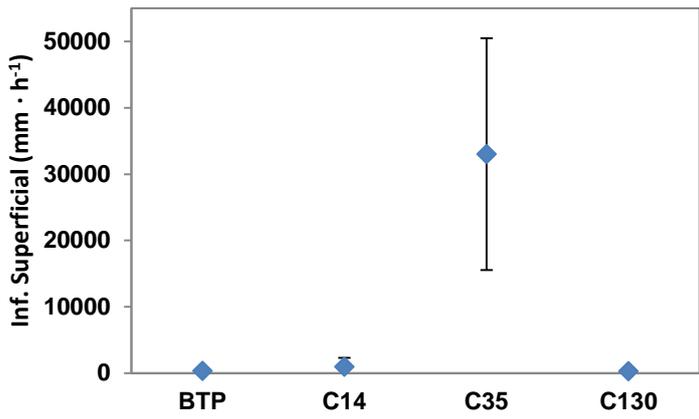


figura 13. Propiedades hídricas del suelo de cañaverales en Cosamaloapan de Carpio y su relación con un área no cultivada. Bosque tropical perennifolio (BTP), cañaveral de 14 años (C14), cañaveral de 35 años (C35), cañaveral de 130 años (C130).

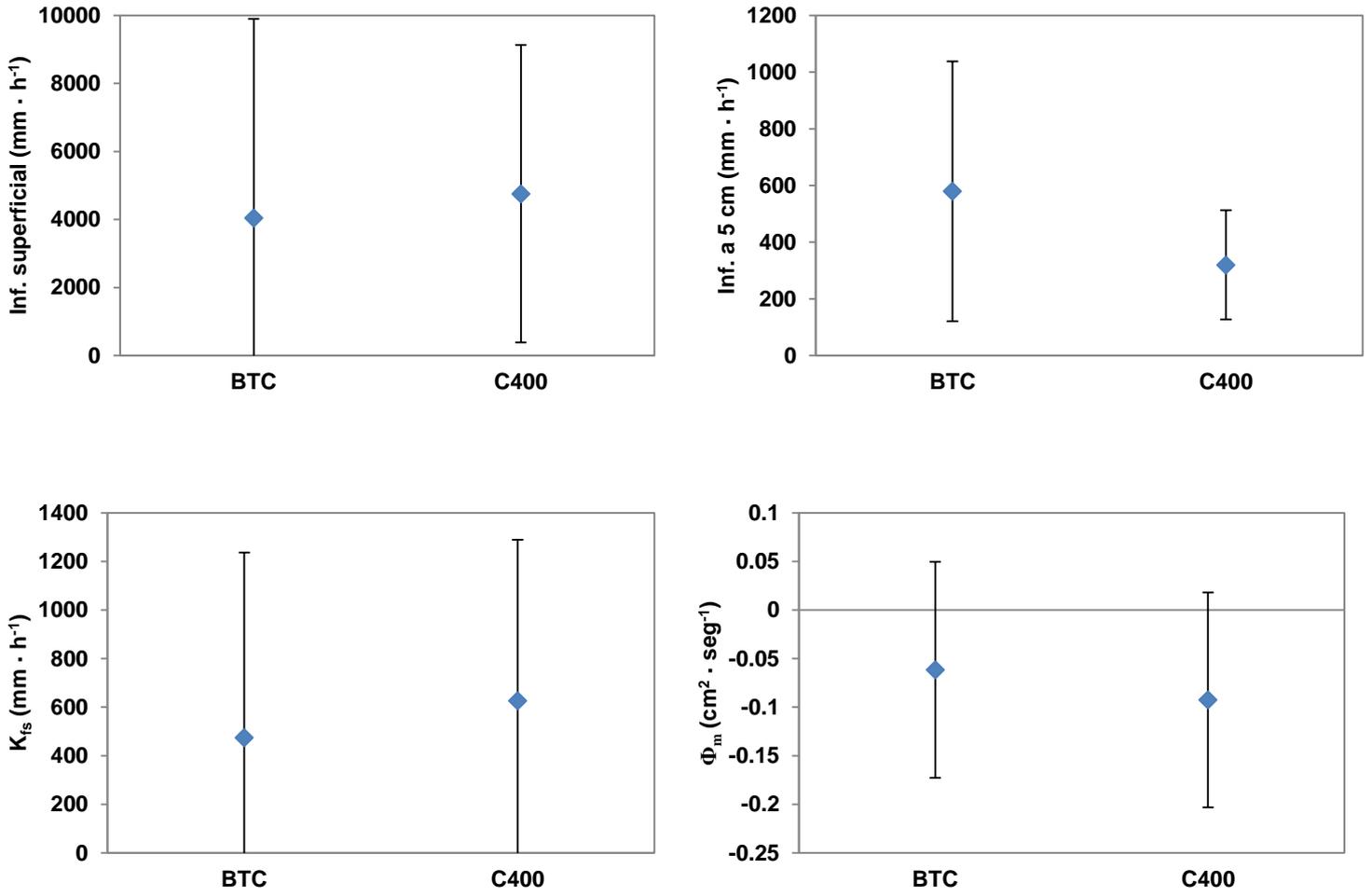


Figura 14. Propiedades hídricas del suelo de cañaverales en Tlaltizapán, Morelos y su relación con un área no cultivada. Bosque tropical caducifolio (BTC) y cañaveral de 400 años (C400).

6.3. Propiedades micromorfológicas

Porosidad y agregación del suelo. En el Bosque se presenta un porcentaje de poros de 18.04%; sin embargo, las quemas en cañaverales durante 35 años de cultivo se incrementa prácticamente el doble pues se observó un aumento de 30.2% para disminuir nuevamente en C130 hasta valores similares en BTP.

El tipo de poros presentes en BTP son canales, fisuras y cavidades en menor proporción; mientras que C14 muestra cavidades y fisuras. Estos poros en C35 incrementan su tamaño, por lo que el porcentaje de porosidad aumenta. Finalmente, en el C130 ocurren canales y cavidades en menor proporción y tamaño.

La estructura presente en BTP es granular y de bloques subangulares. Esta estructura no se modifica en gran medida en los cañaverales, ya que se conservan los bloques subangulares con un grado de agregación de débil a moderado.

En el caso de los suelos de Morelos, el bosque tiene 30.86% de porosidad, y después de 400 años de quemas continuas el contenido disminuye hasta 15.21%; aunque estadísticamente no representa un cambio significativo.

El tipo de poros en BTC son de empaquetamiento compuesto que en C400 se mantienen, además de la presencia de algunos canales.

BTC y C400 no presentan diferencias en la estructura ni el grado de agregación.

Cuadro 11- Propiedades micromorfológicas de los suelos en Cosamaloapan de Carpio, Veracruz (sitio a) y Tlaltzapán, Morelos (sitio b). Cultivo de caña de azúcar y su relación con un área no cultivada. Bosque tropical perennifolio (BTP), cañaveral de 14 años (C14), cañaveral de 35 años (C35), cañaveral de 130 años (C130) en Cosamaloapan de Carpio, Veracruz. Bosque tropical caducifolio (BTC) y cañaveral de 400 años (C400) en Tlaltzapán, Morelos.

Sistema	Agregación	Grado de agregación	Tipo de poros	Porosidad (%)	Observaciones
Sitio a					
BTP	Granular y bloques subangulares	Débil a moderado desarrollo	Canales, fisuras y cavidades	18.04 ± 4.77	Presencia de rellenos, excrementos orgánicos
C14	Bloques subangulares, estructura granular	Débil a moderado desarrollo	Cavidades y fisuras	13.12 ± 2.25	Tejidos carbonizados, residuos vegetales, excrementos orgánicos
C35	Bloques subangulares	Débil a moderado desarrollo	Cavidad, fisuras de mayor tamaño, Canales	30.2 ± 4.51	Nódulo de óxidos nucleado, rellenos, tejidos carbonizados y excrementos orgánicos
C130	Bloques subangulares, estructura granular	Moderado a débil desarrollo	Canales, cavidades y fisuras	18.26 ± 5.32	Tejidos carbonizados, residuos vegetales, excrementos orgánicos
Sitio b					
BTC	Migajosa y granular en menor proporción	Moderado a fuerte desarrollo	Poros de empaquetamiento compuesto, cavidades	30.86 ± 10.41	Tejidos vegetales, Excrementos órgano-minerales, rellenos
C400	Granular	Moderado a fuerte desarrollo	Poros canal y de empaquetamiento compuesto, cavidades	15.21 ± 4.05	Tejidos vegetales y carbonizados, Excrementos órgano-minerales, rellenos

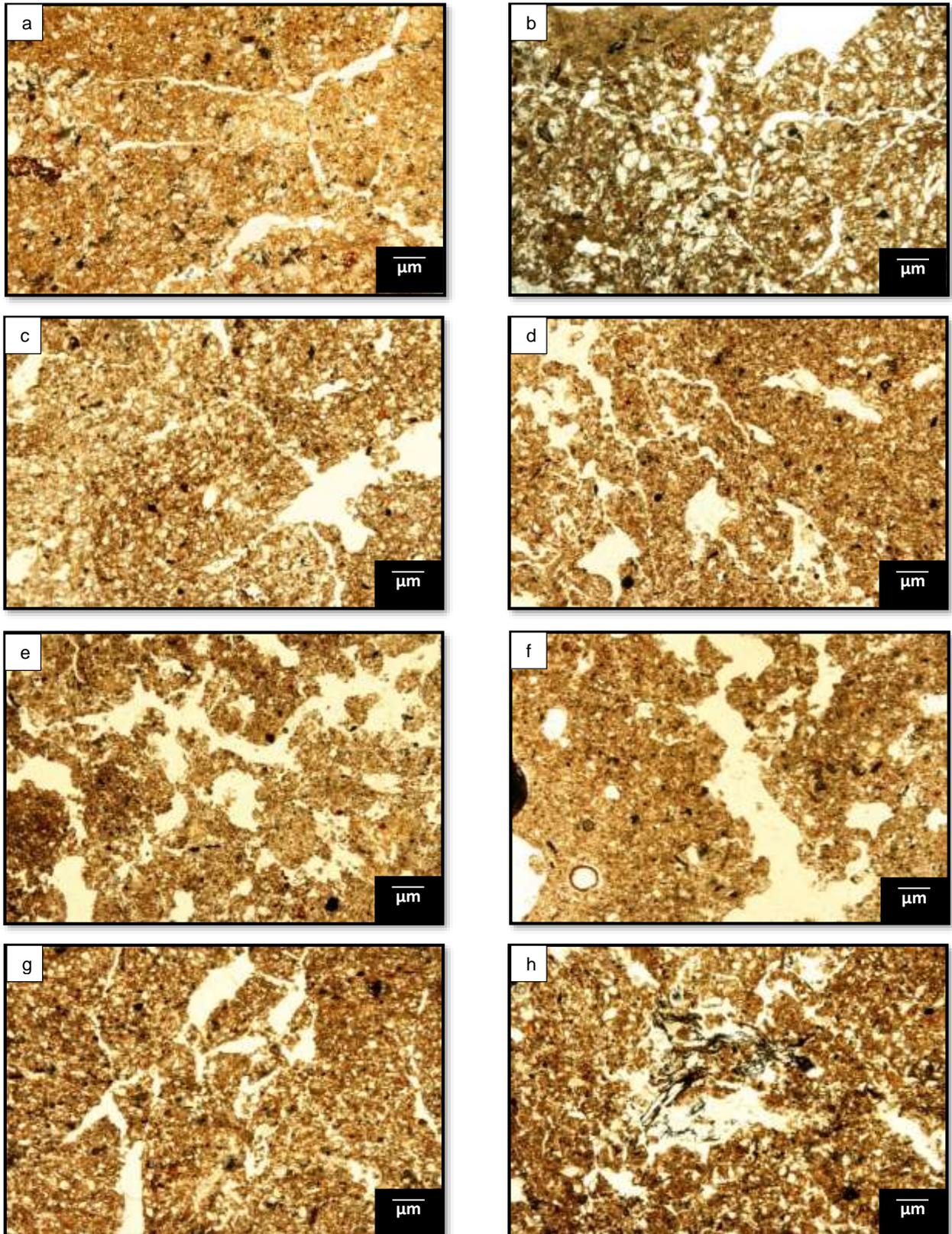


Figura 15. Microfotografías del suelo de Bosque Tropical Perennifolio (a y b), cañaveral de 14 (c y d), 35 (e y f) y 130 años (g y h) respectivamente.

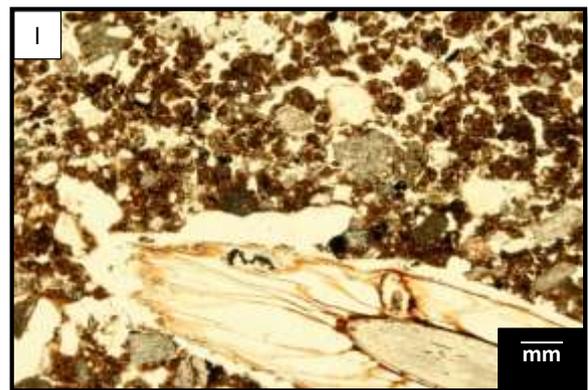
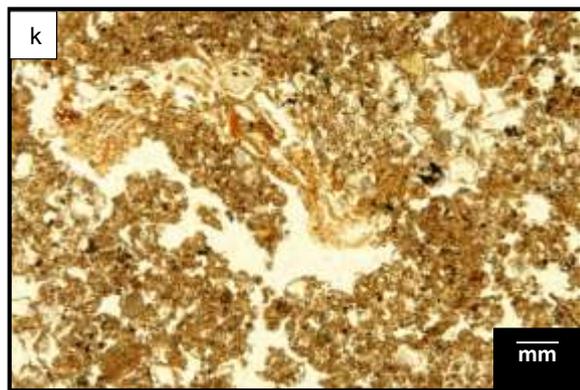
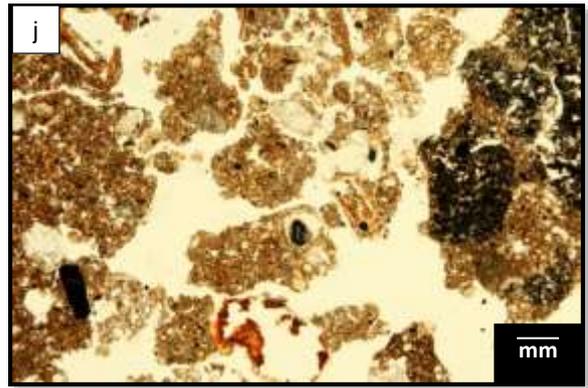
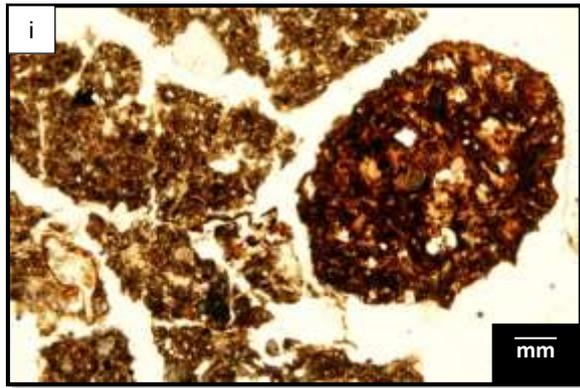
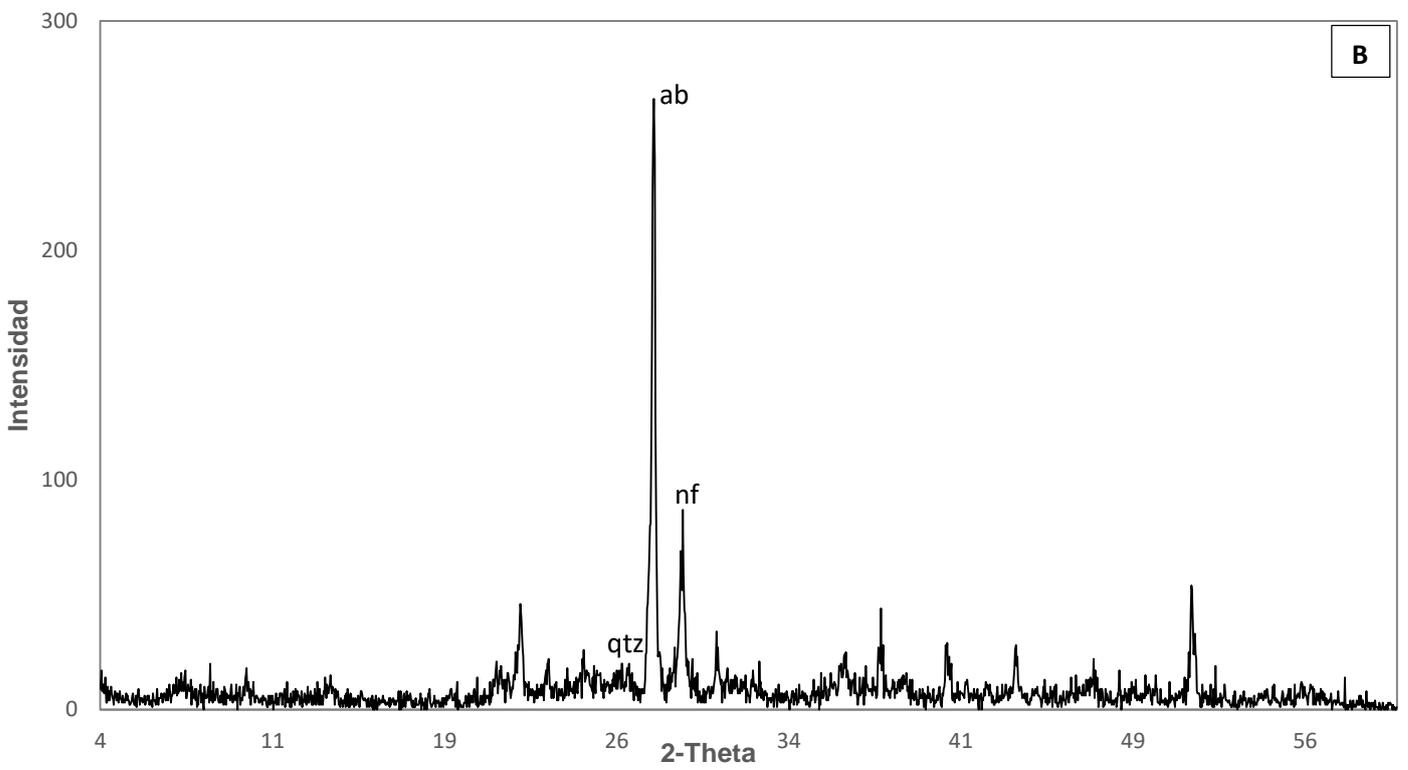
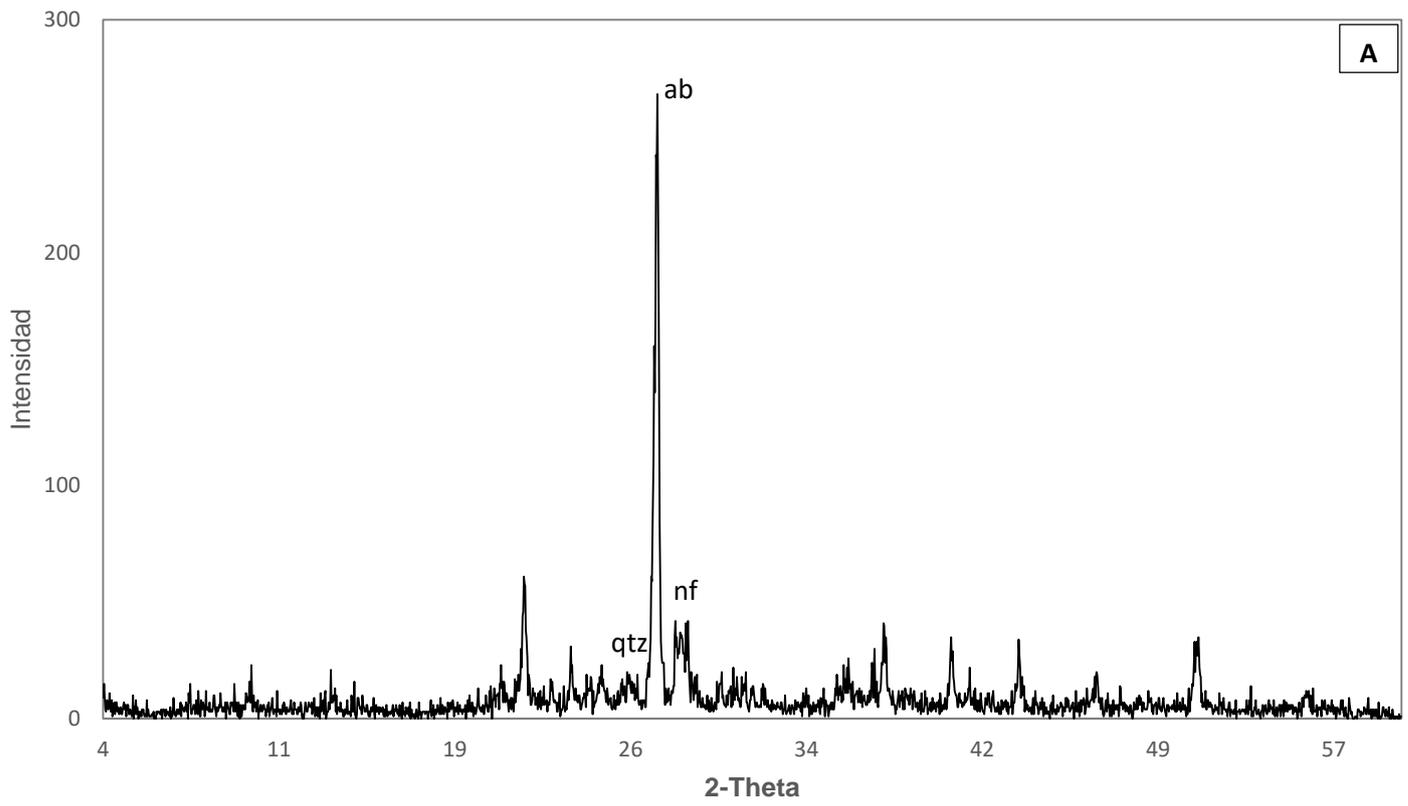


Figura 16. Microfotografías del suelo de Bosque tropical caducifolio (i, j) y cañaveral de 400 años (k y l) respectivamente.

6.4. Propiedades mineralógicas

El análisis mineralógico de la fracción gruesa en Gleysols mostró que la composición de BTP se conforma por albita, Nefelina potásica y cuarzo, básicamente. Esta misma mineralogía se observa en los cañaverales de 14, 35 y 130 años.



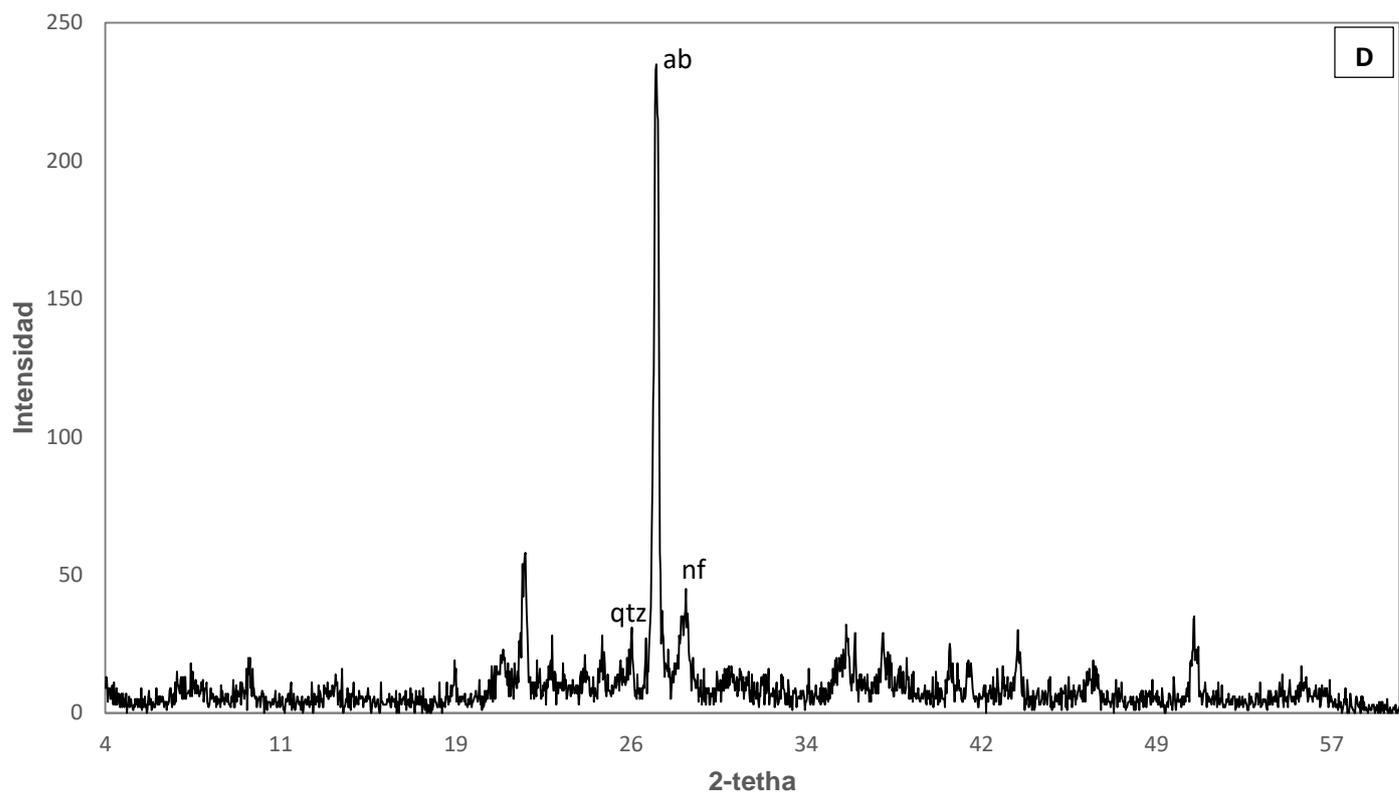
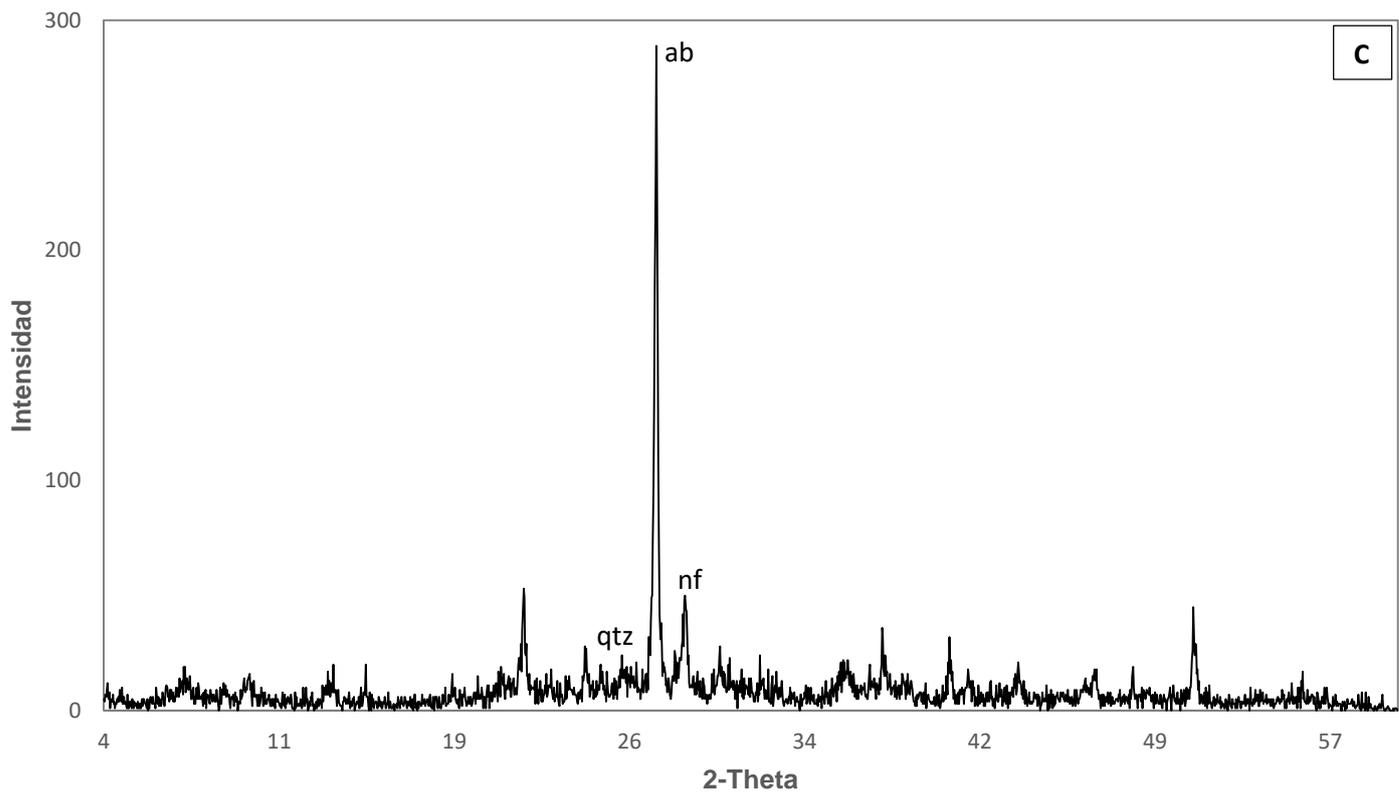


Figura 17- Mineralogía del suelo en Cosamaloapan de Carpio, Veracruz. Cultivo de caña de azúcar y su relación con un área no cultivada. Bosque tropical perennifolio (A), cañaveral de 14 años (B); cañaveral de 35 años (C); cañaveral de 130 años (D). Las letras ab, qtz, nf señalan los minerales albita, cuarzo y nefelina potásica respectivamente.

6.5. Propiedades químicas

En el Cuadro 12 se reportan las propiedades químicas de los suelos en las zonas de estudio. Se determinaron dichas propiedades de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000.

pH. El pH de los suelos es medianamente alcalino en BTP, C14 y C35 y moderadamente ácido en C130. Cuando el manejo tiene 130 años la acidificación del suelo generada llega al límite inferior para el óptimo desarrollo de esta gramínea (Ortiz, 2010).

En el caso de BTC y C400 el valor de pH es medianamente alcalino, ubicándose en el límite superior para el desarrollo de la caña de azúcar; no obstante, no se observaron diferencias a pesar de los años de cultivo.

Porcentaje de materia orgánica (MO). La materia orgánica en BTP es de 3.34%. Con el cambio de uso del suelo y tiempo de actividad agrícola disminuye su contenido; empero se mantiene prácticamente con los mismos valores. Estos porcentajes se encuentran en un intervalo medio según la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Para BTC y C400 los resultados indican que el porcentaje de MO tiene un valor medio.

Porcentaje de nitrógeno (%N). El nitrógeno tiene un comportamiento irregular. El porcentaje en BTP y C35 presenta valores medios. No obstante, en C14 el contenido de nitrógeno es pobre. Los cañaverales C14 y C130 presentaron diferencias significativas con respecto a BTP.

El sitio sin cultivo de caña (BTC) se reportó con un alto porcentaje de nitrógeno, el cual disminuyó en C400 a un valor medio.

Fósforo. De acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000, los valores se clasifican como altos en C130 y BTP, medio C35 y bajo C14.

C400 y BTC los valores son altos y sin diferencias significativas.

Calcio. BTP, C35 y C130 se clasificaron como medios y C14 alto. Todos los sitios presentaron diferencias significativas con relación a BTP excepto C130.

Los valores de Ca para BTC y C400 se encuentran en un nivel medio. No se observaron diferencias significativas.

Sodio. El cañaveral de 130 años se registró la mayor concentración ($0.24 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$); mientras que para C14 y BTP fue de $0.20 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, en C35 se presentó el menor valor $0.18 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$. Por otra parte, BTC mostró el valor más elevado ($0.63 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) seguido de C400 ($0.54 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Magnesio. De acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000, los valores registrados se ubican como medios en C14 y C35, altos en BTP y C130. Para BTC se registraron valores medios y en C400 altos.

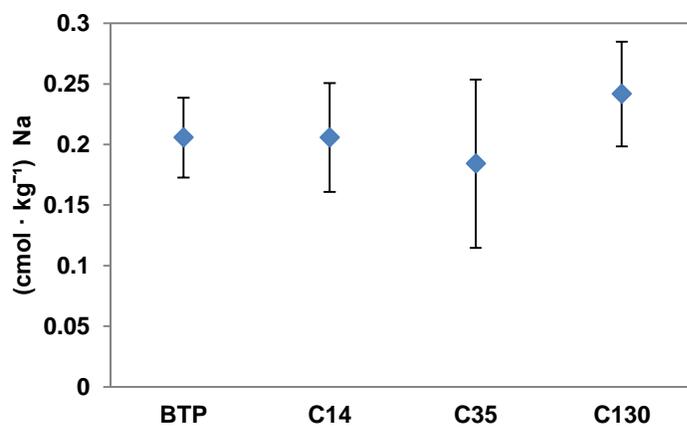
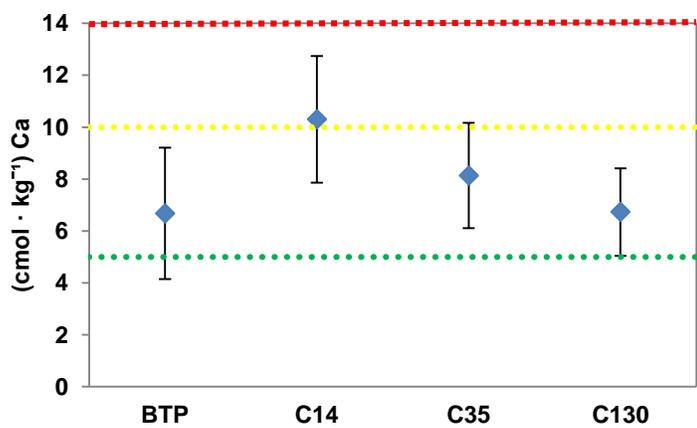
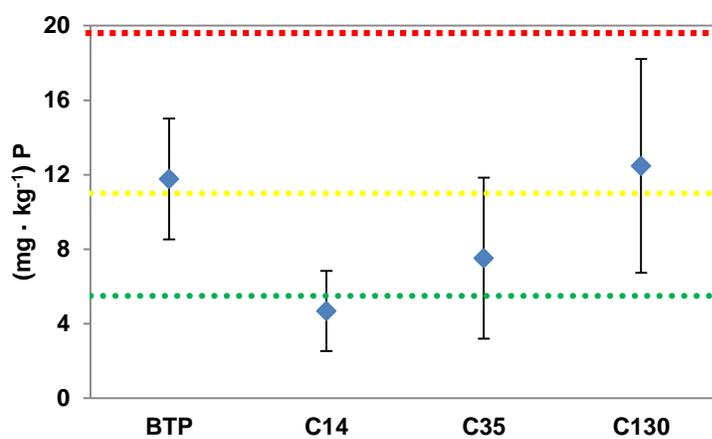
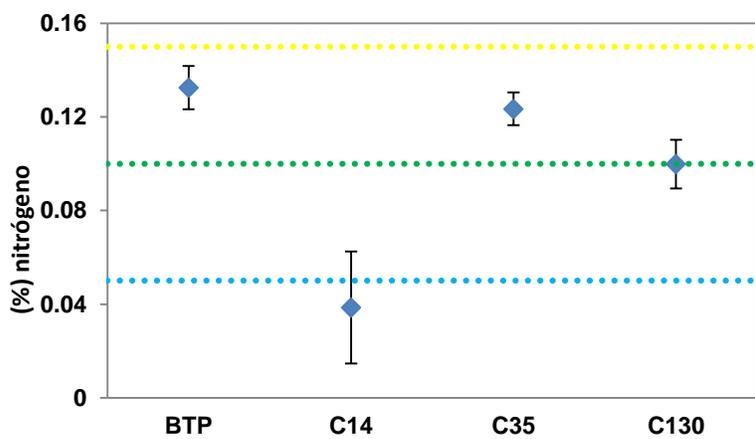
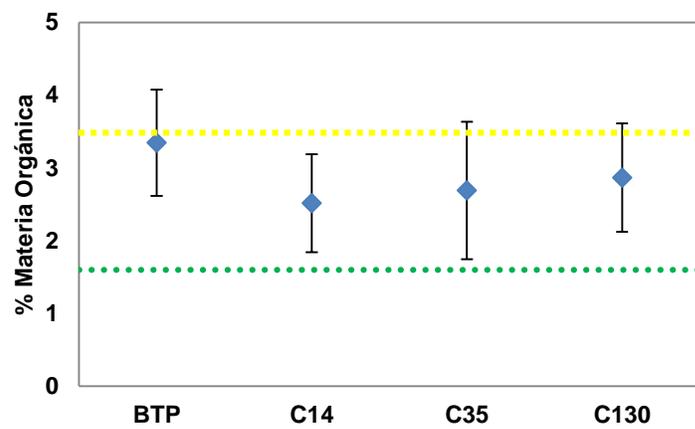
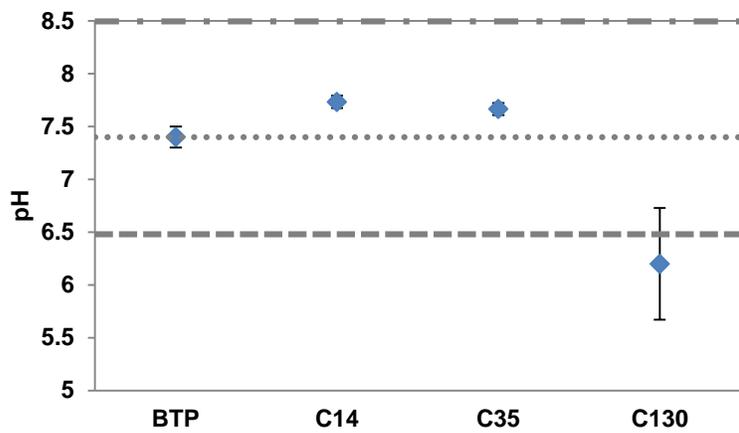
Potasio (K). En BTP y C35 se observó una concentración muy baja, mientras que para C14 y C130 fue baja; tanto en BTC como C400 la concentración de K es media.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC). Todos los sitios en el municipio de Cosamaloapan de Carpio presentaron una concentración media.

En el municipio de Tlaltizapán, C400 presentó una concentración alta mientras que BTC media.

Cuadro 12. Propiedades químicas de los suelos en Cosamaloapan de Carpio, Veracruz (sitio a) y Tlaltizapán, Morelos (sitio b). Cultivo de caña de azúcar y su relación con un área no cultivada. Bosque tropical perennifolio (BTP), cañaveral de 14 años (C14), cañaveral de 35 años (C35), cañaveral de 130 años (C130) en Cosamaloapan de Carpio, Veracruz. Bosque tropical caducifolio (BTC) y cañaveral de 400 años (C400) en Tlaltizapán, Morelos. Las letras diferentes indican diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).

Sistema	pH	MO	Nitrógeno (%)	Fósforo (mg·kg ⁻¹)	Cationes				CIC
					Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺ (cmol·kg ⁻¹)	K ⁺	
Sitio a									
BTP	7.4 ± 0.1 ^a	3.34 ± 0.73 ^a	0.13 ± 0.00 ^{ac}	11.76 ± 3.24 ^a	6.67 ± 2.52 ^a	0.20 ± 0.03 ^a	5.13 ± 1.69 ^a	0.26 ± 0.02 ^{ab}	19.69 ± 5.46 ^a
C14	7.73 ± 0.05 ^b	2.51 ± 0.67 ^a	0.03 ± 0.02 ^{bc}	4.68 ± 2.14 ^b	10.30 ± 2.44 ^{ab}	0.20 ± 0.04 ^a	2.93 ± 0.90 ^{ab}	0.15 ± 0.02 ^{cd}	21.30 ± 14.62 ^a
C35	7.66 ± 0.05 ^b	2.69 ± 0.94 ^b	0.12 ± 0.00 ^{ac}	7.51 ± 4.32 ^b	8.13 ± 2.02 ^b	0.18 ± 0.06 ^a	2.95 ± 2.11 ^b	0.23 ± 0.07 ^{ad}	23.63 ± 5.16 ^a
C130	6.2 ± 0.52 ^c	2.86 ± 0.74 ^a	0.09 ± 0.01 ^b	12.47 ± 5.74 ^a	6.73 ± 1.68 ^a	0.24 ± 0.04 ^a	6.49 ± 4.00 ^{ab}	0.18 ± 0.07 ^{bc}	21.95 ± 2.33 ^a
Sitio b									
BTC	7.8 ± 0.30 ^a	2.99 ± 0.67 ^a	0.24 ± 0.09 ^a	16.63 ± 8.48 ^a	8.77 ± 0.45 ^a	0.63 ± 0.30 ^a	2.61 ± 0.20 ^a	0.49 ± 0.19 ^a	24.34 ± 4.97 ^a
C400	7.8 ± 0.1 ^a	2.95 ± 0.22 ^a	0.13 ± 0.03 ^a	14.21 ± 2.33 ^a	9.92 ± 1.14 ^a	0.54 ± 0.02 ^a	3.22 ± 0.18 ^b	0.55 ± 0.07 ^a	28.93 ± 6.24 ^a



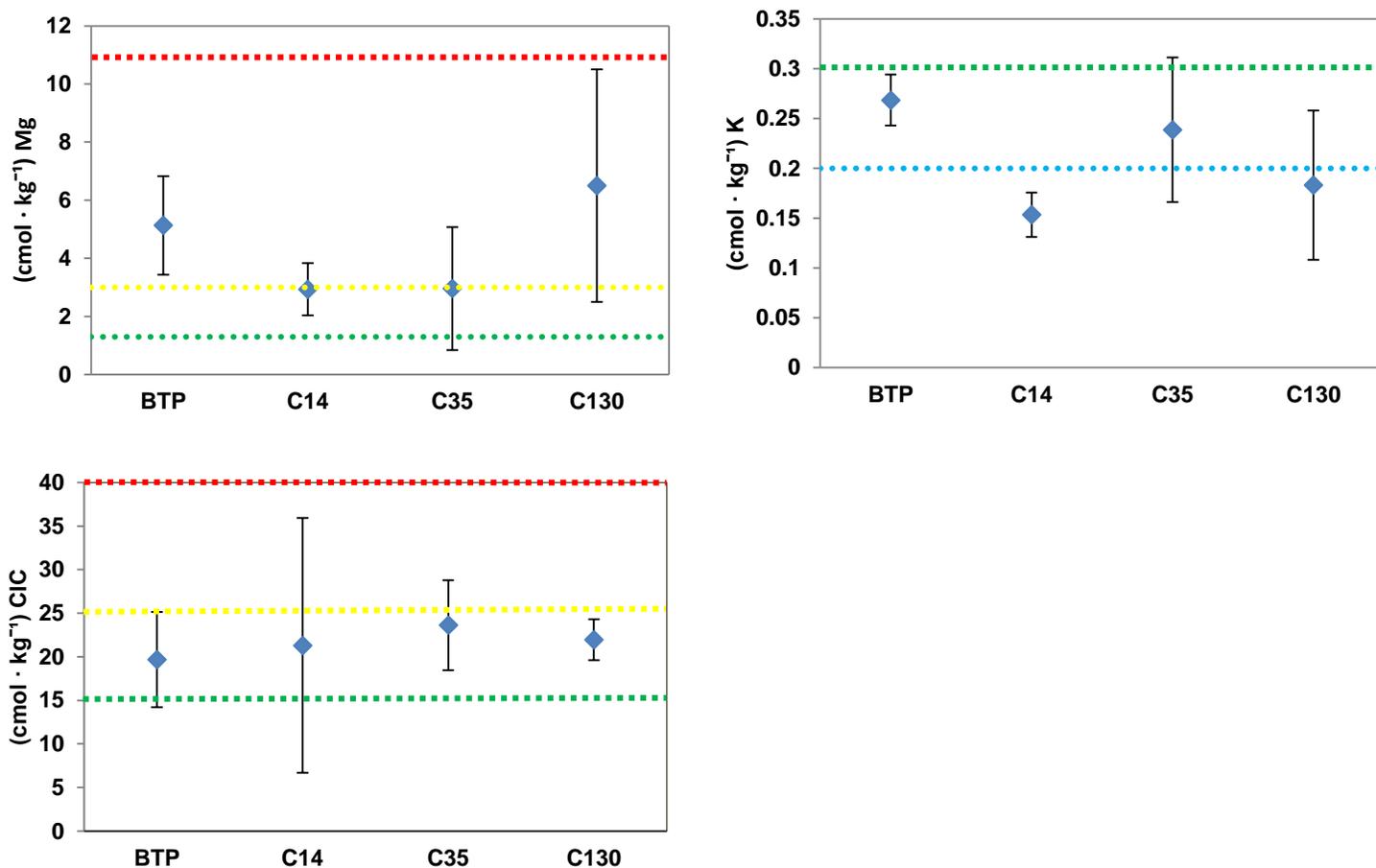
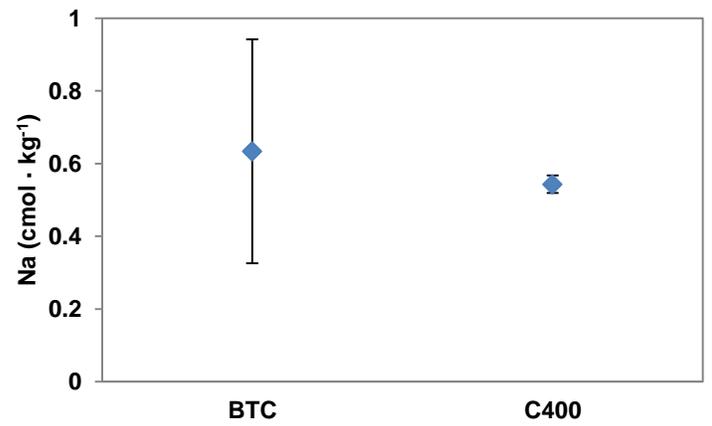
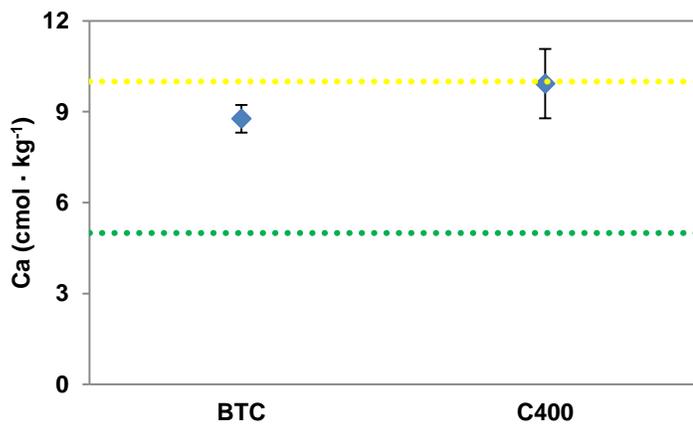
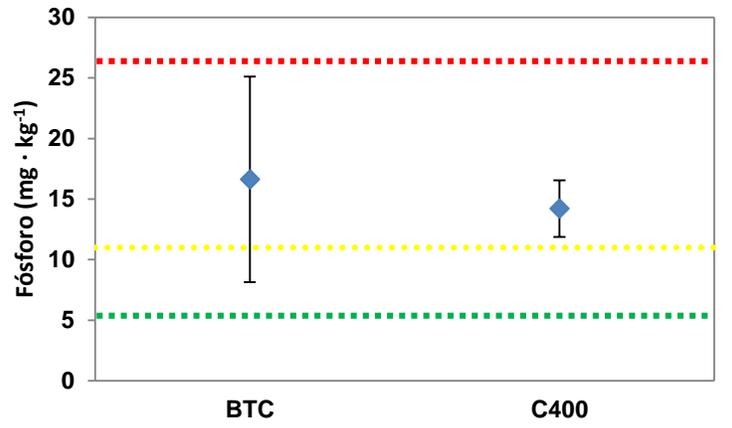
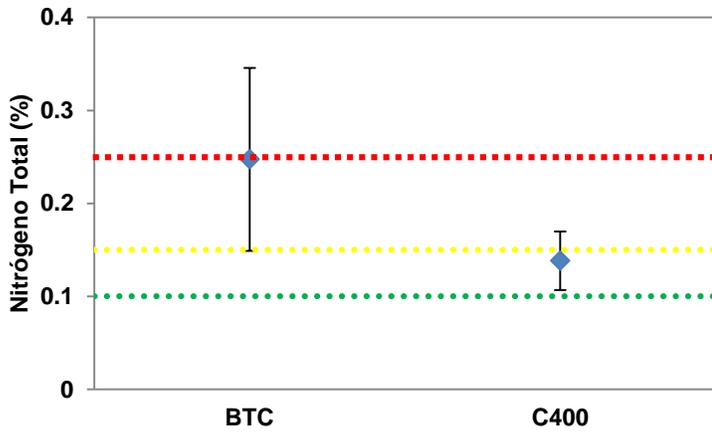
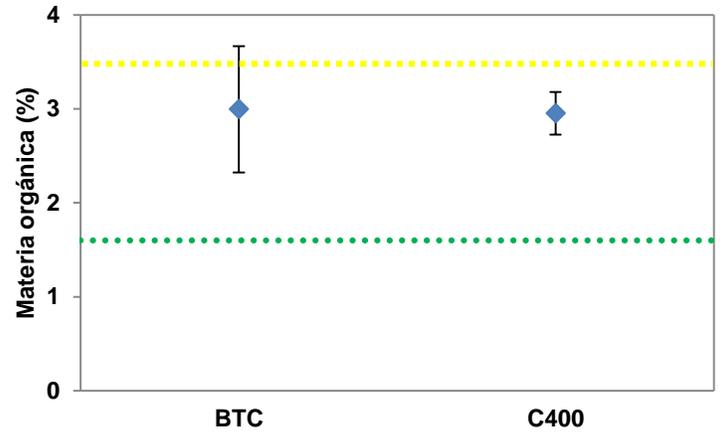
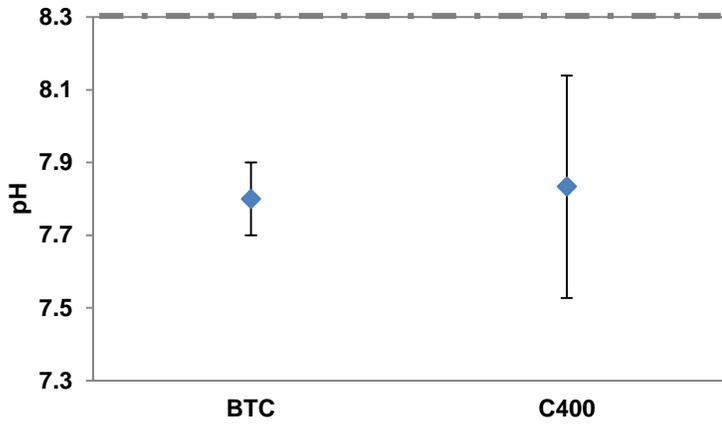


Figura 18. Propiedades químicas de los suelos de cañaverales en Cosamaloapan de Carpio, Veracruz y su relación con un área no cultivada. Bosque tropical perennifolio (BTP), cañaveral de 14 años (C14), cañaveral de 35 años (C35) y cañaveral de 130 años (C130). Debajo de las líneas punteadas azules, verdes, amarillas y rojas indican concentraciones muy bajas, bajas, medias y altas respectivamente, en los valores de pH los guiones, la línea punteada y puntos con guiones señalan parámetros moderadamente ácidos, neutro y moderadamente alcalino respectivamente, de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000.



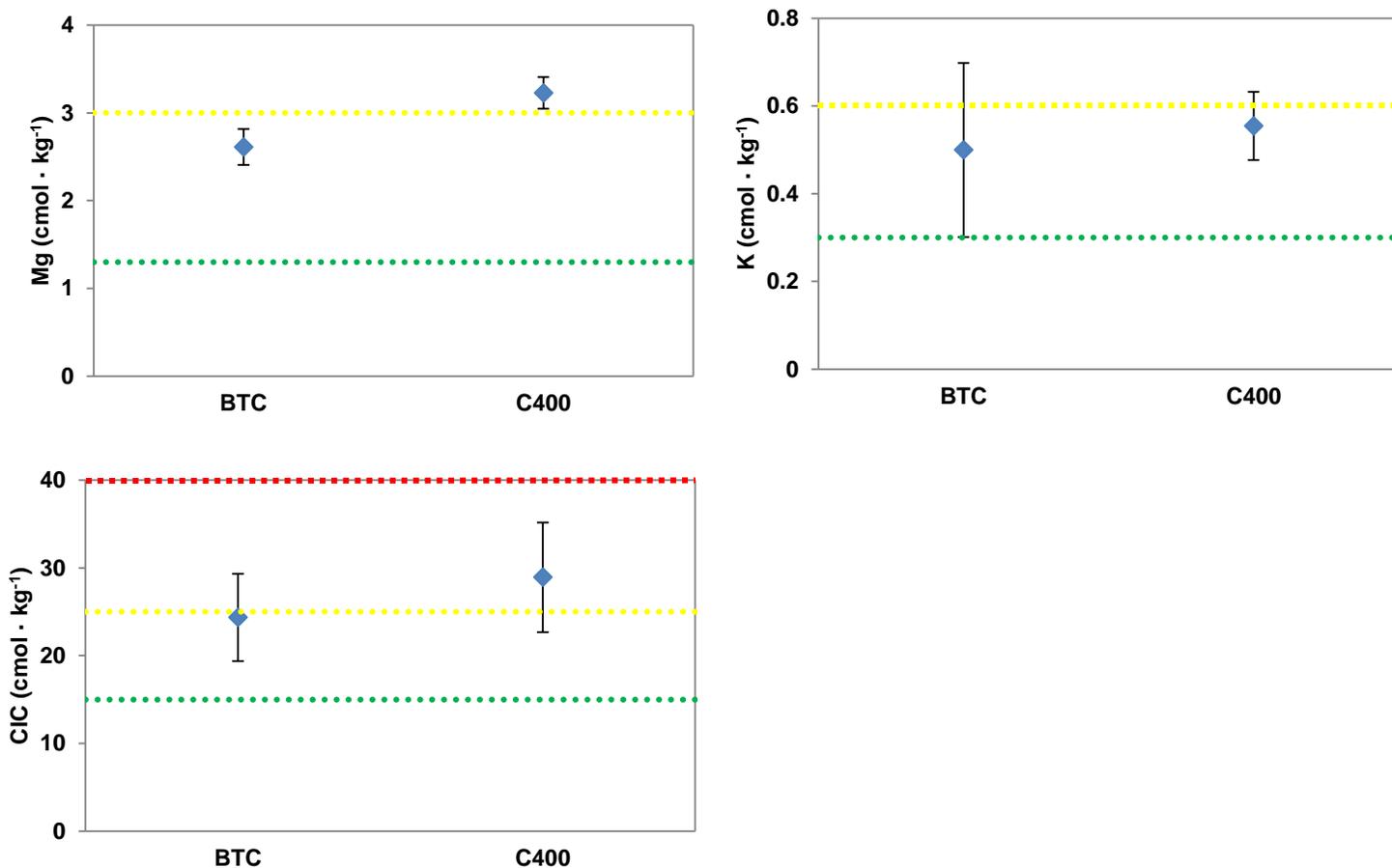


figura 19. Propiedades químicas de los suelos de cañaverales en Tlaltizapán, Morelos y su relación con un área no cultivada. Bosque tropical caducifolio (BTC) y cañaveral de 400 años (C400). Debajo de las líneas punteadas azules, verdes, amarillas, y rojas, indican concentraciones muy bajas, bajas, medias y altas respectivamente, en los valores de pH los guiones señalan parámetros moderadamente ácidos de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000.

7. DISCUSIÓN

7.1. Cosamaloapan de Carpio, Veracruz

7.1.1. Efecto del fuego sobre las propiedades físicas del suelo

Dap. No presentó modificaciones en los suelos de cañaverales con respecto a la zona sin quemar. Esto concuerda con lo encontrado por Teague *et al.* (2010), quienes determinan que la *dap* no presenta cambios en suelos con pastizales antes y después de la quema. Es común que con el cambio de uso de suelo la densidad aparente tenga un incremento con respecto a los suelos de bosques, ocasionado por la compactación y la pérdida de materia orgánica (Brady y Weil, 1999); sin embargo, el hecho de que constantemente se estén incorporando cenizas durante la quema de los cañaverales no altera el espacio poroso, por lo que esta propiedad se conserva a través de tiempos prolongados y con las mismas propiedades que los suelos originales (Stoof *et al.*, 2010).

Porcentaje de humedad. Esta propiedad no muestra diferencias significativas en C14 y C35 a excepción de C130, donde los incendios recurrentes a lo largo de este tiempo han generado una capa hidrófoba (fuertemente repelente; cuadro 9). De acuerdo con Stoof *et al.* (2010), la alta hidrofobicidad no permite el paso del agua en el perfil, disminuyendo así la humedad relativa del suelo. En otros cañaverales esta capa hidrófoba se rompe con el mantenimiento adecuado de la zafra; sin embargo, en C130 esta práctica no se lleva a cabo de manera constante. Esto provocó que el agua no ingresara al suelo y la superficie expuesta a la radiación solar intensificó la hidrofobicidad (Stoof *et al.*, 2010).

Espacio poroso calculado. En los suelos bajo cultivo de caña, el espacio poroso no presenta diferencias significativas al compararlo con BTP. Algunos autores como Hubbert *et al.* (2006), afirman que el fuego destruye la materia orgánica aumentando la *dap* y en consecuencia disminuye la porosidad. En el caso de los cañaverales estudiados, el espacio poroso se mantuvo y puede atribuirse a la incorporación de las cenizas al suelo después de la quema durante las labores correspondientes. Tales resultados coinciden

con lo reportado por Stoof *et al.* (2010), quienes afirman que la incorporación de ceniza al perfil del suelo no obstruye el espacio poroso.

Estructura. El bosque tropical perennifolio presentó una estructura granular y de bloques subangulares. Con el manejo de cultivo de caña por 14, 35 y 130 años ya no hay estructura granular que se forma como resultado de la actividad de lombrices, y se mantuvieron únicamente los bloques subangulares como resultado del redondeo de agregados por las raíces de caña (Gutiérrez *et al.*, 1999). Thomaz (2017) afirmó que en suelos tropicales con cañaverales no hay un patrón directo en la agregación cuando se somete a un gradiente de temperatura. No obstante, si hay diferencias en cuanto a la consistencia de agregados, hasta 35 años los agregados son friables, pero se compactan hasta muy duros cuando el manejo se prolonga (130 años). Are *et al.* (2009) argumentan que esto se debe al carbono del suelo que limita la dispersión de las arcillas y mantiene la estructura del suelo. Es necesario indicar que C130 no contaba con un manejo completo.

Hidrofobicidad. Esta propiedad se presentó únicamente en los cañaverales con 130 años de manejo, limitando el paso del agua al perfil del suelo. DeBano (1998) afirma que, según la temperatura alcanzada puede generarse o destruirse una capa hidrófoba. Es posible que esa capa se haya generado en todos los sitios de muestreo, pero en C130 no se habían realizado las labores del terreno como otros cultivos (C14 y C35). El subsoleo y la rastra rompen la capa hidrófoba y permite el paso de agua por lo tanto ningún otro sitio presentó repelencia al agua.

7.1.2. Efecto del fuego sobre las propiedades hídricas

Infiltración, Conductividad hidráulica y Potencial de flujo mátrico. El cañaveral de 35 años presentó los valores de infiltración y k_{fs} más elevados, siendo el único con diferencias significativas al compararlo con BTP. La infiltración de agua en el perfil del suelo está determinada por la estructura y la distribución de los poros (Teague *et al.*, 2010). Poblano (2013) determinó que el incremento en la infiltración y k_{fs} en acahuales

de distintas edades es causado por la formación de macroagregados y la presencia de poros fisura verticales y horizontales. Este tipo de rasgos se apreciaron a nivel de secciones delgadas en los suelos de cañaveral de 35 años, lo que explicaría el incremento de estas propiedades. Por otra parte, el Φ_m , al presentar valores negativos es indicativo de un nivel freático elevado, característico de Gleysols (WRB, 2014), lo cual corresponde con la clasificación de los suelos estudiados. Para el caso de C14 y C35, se presentaron valores bajos (0.0006 y 0.017 cm² seg⁻¹ respectivamente) los cuales están relacionados con el nivel freático.

7.1.3. Efecto del fuego sobre las propiedades micromorfológicas y mineralógicas

Agregación. En BTP se observa una estructura granular y de bloques subangulares. El efecto del fuego a nivel de microestructura en los cañaverales es más evidente en C35, donde se presentan estructuras fisuradas y de bloques angulares, lo que indica una degradación del suelo. Mataix-Solera y Cerdà (2009) reportaron que el fuego al consumir la materia orgánica destruye macro y microagregados; sin embargo, también puede tener un efecto contrario induciendo la formación de agregados según lo registrado por Andreu *et al.* (2001). Por otra parte, el sistema de labranza de los cañaverales evaluados incluye el subsoleo y se lleva a cabo cada cuatro años, Crespo *et al.* (2006), afirman que el subsoleo favorece la agregación.

Porcentaje de porosidad. En cuanto a la porosidad, el cañaveral de 35 años presentó el valor más elevado (30.2%) al compararlo con BTP (18.04%); representado en poros fisura, cavidades y canales de gran tamaño. Las labores del terreno después de plantar, o en los ciclos de soca y resoca incluyen el paso de la rastra, antes de la fertilización y cuando la caña tiene una altura menor a los 50 cm (com. per. Sr. Felipe, dueño de los cañaverales evaluados).

La acción de la rastra en el incremento en la porosidad solo es temporal (Marcano *et al.*, 1994) lo que explica los valores elevados en C35, que vuelve a sus condiciones iniciales como se observa en C130. No obstante, el fuego juega un papel importante, Soto *et al.* (1991), afirman que los agregados pierden estabilidad al ser sometidos a

temperaturas superiores a 170°C, lo que ocasiona el colapso de agregados y la disminución de la macroporosidad.

Mineralogía. El análisis de la fracción gruesa del suelo no mostró cambios en la mineralogía del suelo, Mataix-Solera *et al.* (2011), señalaron que la alteración de la mayoría de los minerales ocurre a temperaturas elevadas (500°C); sin embargo, hay excepciones que a menores temperaturas pueden sufrir cambios, para el caso de los cañaverales los minerales identificados mediante la difracción de rayos x, no son susceptibles a las temperaturas alcanzadas durante la quema, lo que explica que sin importar los años de manejo, estos se mantienen sin alteraciones.

7.1.4. Efecto del fuego sobre las propiedades químicas

pH. Para BTP se determinó un valor de pH ligeramente alcalino (7.4), así como en los cañaverales de 14 y 35 años (7.73 y 7.66 respectivamente). De las Heras *et al.* (1991) y Pascual (2011) indican que las quemas generalmente incrementan el pH del suelo hasta 0.5 unidades a causa de la incorporación de ceniza o por la desnaturalización de ácidos orgánicos, para después volver a los valores iniciales.

Particularmente en C130 el pH resultó ligeramente ácido (6.2), en donde no se han llevado prácticas de subsoleo y abonado. De acuerdo con Zapata (2004), esta acidificación puede tener su origen en la absorción de nutrimentos por las plantas, que al no contar con la adición de fertilizantes disminuye el pH. Por otra parte, Ortiz (2010) establece que el valor óptimo de pH para el desarrollo de la caña de azúcar va de 6.1 a 7.7 y todos los sitios de cultivo evaluados se encuentran en ese rango.

Porcentaje de materia orgánica. Los valores de MO presentes en los cañaverales estudiados no presentaron diferencias significativas a excepción de C35. Según Osuna *et al.* (2006), la labranza convencional disminuye el porcentaje de materia orgánica. Por otra parte, la destrucción de la MO comienza a los 200°C y es completa alrededor de los 460°C (Giovannini *et al.*, 1988). La hojarasca desaparece antes y durante la quema, por lo que el aporte al suelo es mínimo. Sin embargo, Hernández *et al.* (1995) determinaron

que, el sistema radical de la caña de azúcar aporta MO al perfil del suelo, explicando que se encuentren valores medios en todos los sitios con cultivo de caña.

Porcentaje de nitrógeno. El cultivo de caña por un periodo de al menos 50 años, de acuerdo con Anaya y Huber-Sannwald (2015), ocasiona una pérdida del nitrógeno total en el almacén del suelo. Dada la demanda nutricional del cultivo, este es fertilizado con un compuesto comercial N:P:K (en concentraciones 20:10:20 o 20:10:10) además de urea. El hecho de que los sistemas sean abonados a distintos tiempos explica las diferencias en el porcentaje de nitrógeno encontrado en cada uno de los cañaverales. La disminución de N también se relaciona con la pérdida de la MO. Ribón *et al.* (2003) mencionan que es importante reducir la quema e incorporar los residuos de la caña al suelo.

Fósforo. DeBano (1990) reportó que el fósforo presente en la solución del suelo se volatiliza durante la quema, es por eso que los suelos de cañaverales son fertilizados en cada ciclo después del corte, o durante la siembra. Es importante mencionar que cada cultivo se encontraba en un periodo distinto, lo que explica las diferencias en las concentraciones de este elemento. Además, la labranza ocasiona que la concentración de P disminuya con el tiempo (Yang *et al.*, 2013), por lo que a 130 años de manejo el abonado es indispensable. Por otra parte, Ribón *et al.* (2003) reportaron que las variaciones en la concentración de P pueden ser debido al manejo del cañaveral.

Cationes intercambiables (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺). Las concentraciones de Calcio y Magnesio en los Gleysols fueron distintas para cada cañaveral. Ribón *et al.* (2003) encontraron que después de 30 años de cultivo de un cañaveral estos cationes disminuyen debido a la extracción por la caña de azúcar. Para mantener las concentraciones idóneas de Ca²⁺ sugieren la adición de cal dolomítica o yeso cada cuatro años. Estas disminuciones de Ca²⁺ influyen en la acidificación del suelo (Jaiyeoba, 2003), como puede observarse en C130. La concentración de sodio en los cañaverales presentes en Gleysols no difiere de lo reportado para BTP. Los valores coinciden con lo reportado por Palma (1998) que afirma que se encuentran en el rango óptimo para el

desarrollo de la caña. El aporte de K^+ al suelo no solo viene de la fertilización, sino también de las cenizas que se incorporan después de la quema (Ribón *et al.*, 2003). A pesar de ello, se observa que el K^+ disminuye conforme aumentan los años de cultivo. Knoepp *et al.* (2005) encontraron que el potasio se moviliza fácilmente después de las quemas gracias al lavado por el agua.

Capacidad de intercambio Catiónico. Giovannini *et al.* (1990) reportaron que la CIC decrece progresivamente al aumentar la temperatura en el suelo. Para el caso de los cañaverales de 14, 35 y 130 años es evidente que el fuego no alcanzó la temperatura para modificar las partículas del suelo que influyen en esta propiedad. Sin embargo, la combustión de la materia orgánica explica las variaciones de CIC en los cañaverales de distintas edades (Giovannini *et al.*, 1990).

7.2. Tlaltizapán, Morelos

7.2.1. Efecto del fuego sobre las propiedades físicas del suelo

Dap y porcentaje de humedad. En los cañaverales de 400 años, el fuego no modificó estas propiedades. La *dap* se ve afectada cuando el fuego destruye la materia orgánica, colapsando la estructura y aumentando la densidad (DeBano *et al.*, 2005). Sin embargo, las características del manejo de este cañaveral, como la adición de materia orgánica después de la quema, contribuyen a mantener la *dap* sin diferencias significativas con respecto a BTC. Incluso Ortiz (2010), afirmó que valores de densidad aparente de entre 0.9 a 1.75 $g \cdot cm^{-3}$ se encuentran en un rango normal de acuerdo con la textura. Otro beneficio de la incorporación de la materia orgánica es que mantiene el porcentaje de humedad, si bien se observa una disminución al comparar C400 con BTC no es significativa (Shaxson y Barber 2005).

Espacio poroso calculado y Estructura. Los resultados obtenidos (Cuadro 9) señalan valores elevados en esta propiedad. En ese sentido, Sánchez *et al.* (2005) mencionan que la adición de MO favorece la porosidad, estabiliza la estructura y reduce la densidad

aparente. El fuego en C400 no modificó estas propiedades, dado que en ambos sitios se mantiene una estructura granular.

Hidrofobicidad. En C400 y BTC la gota de agua se absorbió al instante. Mataix (1999) afirma que la combustión de la materia orgánica, así como las cenizas generadas, pueden causar hidrofobicidad. Como ya se ha mencionado, en C400 el manejo implica el retiro de la mayor cantidad de hojarasca posible, reduciendo el combustible. Esto explica que las temperaturas alcanzadas y los residuos de la quema no generen hidrofobicidad en el cañaveral con 400 años de manejo.

7.2.2. Efecto del fuego sobre las propiedades hídricas

Infiltración, Conductividad hidráulica y Potencial de flujo mátrico. Los Vertisols que han sustentado cañaverales por 400 años se caracterizan por la presencia de guijarros y rocas pequeñas (entre 1 a 5 cm de diámetro aproximadamente). Descroix *et al.* (2001), determinaron que la presencia de guijarros en el perfil del suelo tiene una influencia positiva, ya que favorecen la infiltración. Esto explica que a pesar de mantener esta práctica por un largo periodo (400 años), esta propiedad no se vea afectada por la labranza. Por otra parte, el fuego no tuvo influencia en las propiedades hídricas de los Vertisols con cultivo de caña. El manejo en este cañaveral implica retirar la mayor cantidad de materia orgánica posible antes de la quema, esta acción reduce el combustible disponible, y en consecuencia la severidad e intensidad del incendio son menores, por tanto, las propiedades hídricas se mantienen (DeBano y Neary, 2005).

7.2.3. Efecto del fuego sobre las propiedades micromorfológicas

Agregación y Porcentaje de porosidad. La agregación en C400 es evidencia de que el cultivo de caña no ha modificado negativamente la estructura del suelo. Si bien en BTC se observan agregados granulares y migajosos, después de 400 años de cultivo se mantiene una estructura granular. Este tipo de agregados son evidencia de actividad biológica (Kooistra y Pulleman, 2010) y no tanto de la acción del fuego. Mataix-Solera *et*

al. (2011), reportaron que la destrucción de los agregados ocurre principalmente por la pérdida de MO (alrededor de los 220 a 460°C), empero en C400 la materia orgánica se adiciona después de la quema, lo que ayuda a mantener la agregación y la porosidad.

7.2.4. Efecto del fuego sobre las propiedades químicas

pH. Esta propiedad se mantuvo sin cambios al comparar C400 con BTC. El suelo tiene diferentes mecanismos para amortiguar los cambios de pH (Zapata, 2004). El fuego puede generar cambios por la combustión de la MO, o por la deshidratación de algunos minerales (Pascual, 2011). Sin embargo, al no haber combustión de MO y el fuego ser de menor intensidad y severidad no se alteró por la acción del fuego.

Porcentaje de materia orgánica. Los valores presentes de MO en los cañaverales de 400 años son resultado del manejo particular. Si bien se lleva a cabo la quema del cañaveral antes del corte, previo a la quema se recolecta la mayor cantidad de hojarasca y residuos vegetales para incorporarlo al suelo posteriormente. Este manejo, contribuye a mantener niveles óptimos de MO en C400. La incorporación de los residuos contribuye al mantenimiento de otras propiedades, como agregación y porosidad Ramírez *et al.* (2006). El aprovechamiento de los residuos vegetales de la caña de azúcar mantiene estable el contenido de MO además de conservar otras propiedades como la fertilidad y humedad (Loveland y Webb, 2003). Esto evidencia que es necesario evitar la quema hasta donde sea posible e incorporar los residuos de cosecha (Oliveira *et al.*,1993).

Porcentaje de nitrógeno. El manejo particular en C400 incluye la asociación de la caña de azúcar con algunas leguminosas como frijol y haba. Anaya y Huber-Sannwald (2015), encontraron que conforme aumentan los años de manejo en los cañaverales, el nitrógeno total en el almacén del suelo disminuye. Para el caso de C400, al compararlo con BTC señala valores sin diferencias significativas. La simbiosis presente en las leguminosas deriva en un mayor porcentaje de nitrógeno disponible para la caña de azúcar (Graham y Vance, 2000).

Fósforo. Esta propiedad se mantiene sin cambios en el cañaveral de 400 años. De acuerdo con Damon *et al.* (2014), la presencia de leguminosas no solo beneficia el porcentaje de nitrógeno en el suelo, también tiene una influencia en la concentración y disponibilidad de este nutriente. Si bien, las quemas pueden volatilizar el P en el suelo (DeBano, 1990), las leguminosas mantienen esta propiedad sin cambios.

Cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+). En cuanto a esta propiedad, según DeBano (1990), después de un incendio de baja intensidad no se reportaron deficiencias. El calcio y el magnesio no presentaron diferencias significativas. En un cultivo de caña evaluado por Ribón *et al.* (2003) las concentraciones de estos cationes disminuyeron. Este efecto se debió a la extracción por la caña de azúcar. Para el caso de C400, los residuos de la caña mantienen los cationes en los valores óptimos. La concentración de sodio en C400 no difiere de lo reportado para BTC. Los valores coinciden con lo reportado por Palma *et al.* (1998), que afirma que se encuentran en el rango óptimo para el desarrollo de la caña. El potasio presenta un aumento después de 400 años de cultivo, aunque no es significativo. Este aumento puede ser ocasionado por el aporte de las cenizas al perfil del suelo (Ribón *et al.*, 2003). Además, el monocultivo de caña no altera el reservorio de K^+ en Vertisols independientemente de los años de manejo (Bolio *et al.*, 2008).

Capacidad de intercambio catiónico. Otero *et al.* (1998), afirman que la capacidad de intercambio catiónico en Vertisols está dada principalmente por la fracción mineral más que por la materia orgánica. Al comparar los resultados de CIC de los cañaverales de 400 años contra BTC no se observan diferencias significativas. Otero *et al.* (1998), afirman también que en Vertisols bajo cultivo es necesario mantener el aporte de materia orgánica para evitar la disminución de la fertilidad. Como ya se ha mencionado, C400 cuenta con un aporte constante de MO que ayuda a mantener los valores de CIC sin diferencias significativas.

7.3. Cultivo de caña y sustentabilidad

Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Ramírez *et al.* (2006) en cultivos bajo labranza cero o labranza de conservación. En su investigación, las propiedades físicas, hídricas, químicas y micromorfológicas se mantienen incluso en parcelas con más de diez años de manejo. Si bien afirman que al comparar labranza cero contra labranza convencional no son estadísticamente diferentes, los cambios son ocasionados por un mayor contenido de materia orgánica en la labranza cero. Brito *et al.* (2006) coinciden en que el laboreo agrícola disminuye la meso y micro fauna del suelo, la cual mantiene o incrementa las propiedades físico-químicas ideales para el cultivo.

El cultivo de caña por 400 años no ha afectado las propiedades del suelo, lo que es evidencia de un manejo sustentable (Casas, 2001). Esto es debido a la similitud entre la labranza de conservación y el cultivo de caña. En el cultivo de caña, desde la siembra hasta el término de los ciclos de resoca la intervención del arado es mínimo. Para llevar a cabo las labores de mantenimiento se usa el subsolador y o la rastra, y solo cuando la planta tiene menos de 50 cm. Una vez que supera esta altura, no vuelven a intervenir de manera mecánica hasta la cosecha. La quema facilita la cosecha que además se realiza con cortadoras automáticas o de manera manual. Esta mínima intervención además de los periodos de barbecho (que suelen ser de un año) ayuda al mantenimiento apropiado de la productividad (Altieri y Nicholls, 2000).

8. CONCLUSIONES

El fuego en los cañaverales no modificó las propiedades físicas, hídricas, micromorfológicas, mineralógicas y químicas de un vertisol con 400 años de manejo.

Los Gleysols bajo cultivo de caña mantuvieron sus propiedades, a excepción de C130, donde la falta de manejo alteró principalmente el porcentaje de humedad, hidrofobicidad, infiltración y conductividad hidráulica.

En el estado de Morelos la incorporación de los residuos vegetales, aunado a la siembra de leguminosas conserva las propiedades del suelo; en contraste con los cañaverales de Veracruz que presentan modificaciones en la estructura ocasionada por la quema de la materia orgánica y la hidrofobicidad.

El cultivo de caña en las dos zonas estudiadas tiene un manejo sustentable ya que se ha mantenido la producción a través de largos periodos de tiempo.

La diferencia en el manejo de los cañaverales de cada sitio (Cosamaloapan de Carpio y Tlaltizapán) influye en el rendimiento obtenido tras la cosecha.

9. LITERATURA CITADA

- Anaya, C., Huber-Sannwald, E., 2015. Long-term soil organic carbon and nitrogen dynamics after conversion of tropical forest to traditional sugarcane agriculture in East Mexico. *Soil & Tillage Research* 147: 20–29.
- Andreu, V., Imeson, A., Rubio, J.L., 2001. Temporal changes in soil macro and microaggregation induced by forest fires and its incidence on water erosion. *Catena* 44, 69–84.
- Ángeles, C., 2010. Efectos ecológicos de los incendios forestales sobre el bosque de oyamel. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo Texcoco, Estado de México.
- Albán, T. 2009, Índice preliminar de compactación y propiedades hidrológicas en suelos cálcicos bajo caña de azúcar (*saccharum officinarum* L). Facultad de Ciencias Agropecuarias Coordinación General de Postgrados Palmira. Universidad Nacional de Colombia.
- Altieri, M., Nicholls, C., 2000. Agroecología. Teoría y práctica para una agricultura sustentable. 1ª edición. PNUMA.
- Are, K., Oluwatosin, G., Adeyolanu, O., Oke, A., 2009. Slash and burn effect on soil quality of an Alfisol: Soil physical properties. *Soil & Tillage Research* 103: 4–10.
- Bangita, B., Rajashekhar Rao, B., 2012. Impacts of compaction relief treatments on soil physical properties and performance of sugarcane (*Saccharum* spp.) under zonal tillage system. *Geoderma* 189–190: 351–356.
- Bolio, L., Salgado, G., Palma, L., Lagunes, E., Castelán, E., Etchevers, B., 2008. Dinámica del potasio en vertisoles y fluvisoles cultivados con caña de azúcar. *Terra Latinoamericana* 26: 253-263.
- (Brady y Weil, 1999)
- Bravo, C., Andreu, E., 1995. Propiedades físicas y producción de maíz (*Zea mays* L.) en un alfisol del estado Guárico, Venezuela , Bajo Dos Sistemas De Labranza. *Venesuelos*, 3, 62–68.
- Brito, V., Espinoza, V., Figueroa, S., Fragoso, C., Patrón, I., 2006. Diversidad de Lombrices de tierra con labranza de conservación y convencional. *Terra Latinoamericana* vol:24, 99-108.
- Bullock, P., Jongerius, A., Tursina, T., Fedoroff, N., Stoops, G., 1999. Manual para la descripción micromorfológica de suelos. Trad. al español por Ma. C. Gutiérrez C.

- y C.A. Ortiz S. 1a edición. Colegio de Postgraduados. Texcoco, estado de México, México.
- Casas. R., 2001. La conservación de los suelos y la sustentabilidad de los sistemas agrícolas. Disertación acto entrega Premio Antonio Prego. INTA, Argentina.
- Chávez, B., 2011. Efectos del sistema roza, tumba y quema sobre el servicio ambiental hidrológico de un bosque tropical perennifolio de la cueca del papalopan, Oaxaca. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza.
- COLPOS y FUNPROVER, 2003.
- CONADESUCA, 2015. Cosecha de caña de azúcar en estado verde. Boletín técnico informativo
- COVECA. 2010. Monografía de la caña de azúcar. Gobierno del Estado de Veracruz. México.
- Crespo, G., Otero, L., Calero, B., Morales, A., 2006. Efecto de labores mecánicas en la rehabilitación de un pastizal de Guinea likoni (*Panicum maximum* Jacq.) y en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Revista cubana Ciencia agrícola. 40:485.
- Damon, M., Bowden, B., Rose, T., Rengel, Z., 2014. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: A review. *Soil Biology & Biochemistry* 74: 127-137
- DeBano, F., 1990. The effect of fire on soil properties. Symposium on management and productivity of Westero-Montane Forest Soils, Boise.
- DeBano, F., Neary, G., Folliott, F., 1998. Fire: its effect on soil and other ecosystem resources. John Wile & Sons, Inc. USA.
- DeBano, F., Neary, G., Folliott, F., 2005. Chapter 2, Soil physical properties. Wildland fire in ecosystems, effects of fire on soil and water. USDA Forest Service.
- De las Heras, J., Martínez, J., Herranz, J., 1991. Impacto ecológico de los incendios forestales. *Revista de estudios albacetenses*, 29, 105-117
- Dekker, L., Jungerius, P. 1990. Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands. *Catena Supplement* 18, 173-183.
- Descroix, L., Viramontes, D., Vauclin, M., Gonzalez-Barrios, J.L., Esteves, M., 2001. Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico). *Catena* 43: 115–135

- Domingo, J., Villarán, F., Corral-Pazos, E., Rapp-Arrarás, I., 2006. Estimación de la capacidad de retención de agua en el suelo: revisión del parámetro CRA. *Invest Agrar: Sist Recur For.* 15(1): 14-23.
- Fernández, L., Rojas, N., Roldán, T., Ramirez, M., Zegarra, H., *et al.* 2006. Análisis físicos y químicos en suelo. Cap. 4. Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. INECC. México.
- Flores, L., Alcalá, J., 2010. Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de física de suelos. UNAM. Instituto de Geología, departamento de edafología.
- Gabriels, D., Lobo D., Pulido M., 2006. Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada. *Venesuelos*, 7-22.
- Galvis, J. H., Amézquita, É., Madero, É., 2008. Evaluación del efecto de la intensidad de la labranza en la formación de costra superficial de un oxisol de sabana en los Llanos Orientales de Colombia: III. Caracterización micromorfológica en superficie. *ACTA AGRON (PALMIRA)*, 57, 19–29.
- García, E., 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. UNAM. México.
- García, H., García, H., Castellanos, V., Cano, S., Peláez, R. 2008. Variación de la velocidad de infiltración media en seis ecosistemas inalterados. *TERRA Latinoamericana*, Vol:26, No:1, enero-marzo 21-27
- Giovannini, G., Lucchesi, S., Giachetti, M., 1988. Effects of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility. *Soil Science* 146: 255–261
- Giovannini, G., Lucchesi, S., Giachetti, M., 1990. Effects of heating on some chemical parameters related to soil fertility and plant grow. *Soil Science* 149: 344–350
- Glenn, N., Finley, C., 2010. Fire and vegetation type effects on soil hydrophobicity and infiltration in the sagebrush-steppe: I. Field analysis. *Journal of Arid Environments* 74: 653–659
- González, V., 2011. Ecohidrología de un bosque de oyamel: diagnóstico y rehabilitación. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza. México.
- Grahama, P., Vance, C., 2000. Nitrogen fixation in perspective: an overview of research and extension needs. *Field Crops Research* 65, 93-106.
- Gutiérrez, C., Reyes, Ch., Figueroa, S., 1999. Desarrollo estructural en un entisol bajo el sistema de labranza de conservación y tradicional. *Terra* Vol: 17 No:2
- Gutiérrez, C., Ortiz, S., 1999. Manual para la descripción micromorfológica de suelos. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo Texcoco, Estado de México.

- Hartemink, A., 1998. Soil chemical and physical properties as indicators of sustainable land management under sugar cane in Papua New Guinea. *Geoderma* 85, 283–306
- Hernández, I., Medina, E., López, H., 1995. Respiración edáfica y aportes de materia orgánica por las raíces y la hojarasca en un cultivo de caña de azúcar. *Agronomía Tropical* 45(1): 121-142
- Hernández, M., Salgado, G., Palma, L., Lagunes, E., Castelán, E., Ruiz, R., 2008. Vinaza y composta de cachaza como fuente de nutrientes en caña de azúcar en un gleysol mólico de Chiapas, México. *Interciencia*. vol:33 No:11 855-860
- Huang, J., Yang, J., Msangi, S., Rozelle, S., Weersink, A., 2012. Biofuels and the poor: Global impact pathways of biofuels on agricultural markets. *Food Policy* 37, 439–451
- Hubbert, K., Preisler, H., wohlgemuth, P., Graham, R., Narog, M., 2006. Prescribed burning effects on soil physical properties and soil water repellency in a steep chaparral watershed, southern California, USA. *Geoderma* 130, 284– 298
- INEGI, 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Cosamaloapan de Carpio, Veracruz de Ignacio de la Llave. Clave geoestadística 30045.
- INEGI, 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Tlaltizapán, Morelos. Clave geoestadística 17024.
- IUSS, ISRIC,FAO, 2007. Base refencial mundial del recurso suelo.Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional. *Informes sobre recursos mundiales de suelos* 103.
- Jaiyeoba, 2003,
- Jaramillo, D., 2006. Repelencia al agua en suelos: una síntesis. *Acad. Colomb. Ciencias de la tierra*. vol:30 No:115
- Jordán, L., 2005. *Manual de Edafología. Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla*. España.
- Julca, O., Meneses, F., Blas, F., Bello, A., 2006. La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. *IDESIA Vol:24 No:1* 49-61
- Knoepp, J., DeBano, L., Neary, D., 2005. Chapter 3, Soil Chemistry. *USDA Forest Service*.
- Kooistra, M., Pullerman, M., 2010. Chapter 18. Features related tu faunal activity. *Interpretations of micromorphological features of soils and regoliths*. Elsevier.
- Leyva, S. L., Masaguer, A., Baldoquin, A. 2014. Efecto de sistemas de labranza en luvisoles dedicados a la producción de pastos. *Pastos Y Forrajes*, 37(4), 408–412.

- Lipiec, J., Wójciga A., Horn R., 2009. Hydraulic properties of soil aggregates as influenced by compaction. *Soil & Tillage Research* 103, 170–177
- Loveland, P., Webb, J., 2003. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soil of temperate regions: a review. *Soil Tillage Res.* 70: 1-18.
- Luque, J., Peinemann, N., 1995. Conductividad Hidráulica en suelos verticos del valle inferior del rio Chubut frente a la aplicación de diferentes enmiendas. *Ciencia del suelo* 13, 70-75.
- Martínez, J., Cotler, H., Etchevers, B., Ordaz, C., León, G., 2008. Efecto del manejo en la agregación del suelo en un ecosistema tropical seco. *Terra Latinoamericana* vol: 26 No: 4 299-307.
- Marcano, F., Ohep, C., Francisco, D., 1994. Efecto de la Labranza y del nitrógeno en algunos componentes del rendimiento, macroporosidad del suelo, densidad radical y producción del maíz *Zea mays* L. *Agronomía Tropical* 44(1): 5-22.
- Mardamootoo, T., NG, Kwong., Preez, Du.. 2013. Assessing environmental phosphorus status of soils in Mauritius following long term phosphorus fertilization of sugarcane. *Agric. Water Manage.* 117:26-32.
- Mataix (1999)
- Mataix-Solera, J., Cerdà, A. 2009 Incendios forestales el España. *Ecosistemas Terrestres y suelos. Cátedra de divulgación de la ciencia. Universidad de Valencia.* pp 25-53.
- Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Arcenegui, V., Jordán, A., Zavala, L., 2011. Fire effects on soil aggregation: A review. *Earth-Science Reviews* 109, 44–60.
- Mineral Powder Diffraction File (2002).
- Moody, J., Kinner, D., Úbeda, X., 2009. Linking hydraulic properties of fire-afected soils to infiltration and water repellency. *Journal of hydrology* 379, 291-303.
- Ng Cheong, L., Ng Kee Kwong, K., Ah Koon, P., Du Preez, C., 2009. Changes in an Inceptisol of Mauritius after rock removal for sugar cane production. *Soil & Tillage Research* 104, 88–96.
- Oliviera, O., Guimaraes, H., Urquiaga, S., Boddey, R., 1993. Efecto a largo plazo de la quema pre-cosecha en la producción de caña de azúcar y la fertilidad del suelo. *Memorias de los Seminarios Interamericanos de la Caña de Azúcar.* Miami, Florida, EU. pp. 292-300.
- Ortiz, S., 2010. *Edafología.* Universidad Autónoma Chapingo. 8ª edición.
- Ortiz, L., Salgado, S., Castelán, E., Córdova, S., 2012. Perspectivas de la cosecha de la caña de azúcar cruda en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 767-773

- Osuna, C., Figueroa, S., Oleschko, K., Flores, D., Martínez, M., González, C., 2006. Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia* 40: 27-38.
- Otero, L., Ortega, S., Morales, M., 1998. Participación de la arcilla y la materia orgánica en la capacidad de intercambio catiónico de vertisoles de la provincia Granma.
- Palma, L., Obrador, O., Valdez, B., Zavala, C., Juárez, L., Puebla, E., 1998. Dosis de fertilización en caña de azúcar para el sur del área de abastecimiento del ingenio Pdte. Benito Juárez. GITCAÑA. Colegio de Postgraduados Campus Tabasco.
- Parral, L., 2014. Las organizaciones de Productores de caña y sus relaciones de poder. El caso de la asociación de cañeros de Casasano, en Cuautla de Morelos, México. *Pueblos y Fronteras*. 9(18):81-90.
- Pascual, A., 2011. Efectos a corto y largo plazo del fuego sobre algunas propiedades del suelo. Incendios naturales e incendios experimentales bajo condiciones de campo y de laboratorio. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla.
- Perales, A., Loli, O., Alegre, J., Camarena F., 2009. Indicadores de sustentabilidad del manejo de suelos en la producción de arveja (*Pisum sativum* L). *Ecología Aplicada*, 8(2):47-52.
- Poblano, J., 2013. Efectos del fuego sobre las propiedades hídricas del suelo del bosque tropical perennifolio en la región Lacandona, Chiapas. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza. México.
- Ramírez, B., Figueroa, S., Ordaz, C., Volke, H., 2006. Efecto del sistema de labranza cero en un Vertisol. *Terra Latinoamericana* vol:24, 109-118
- Reynolds, W., Elrick, D., 1985. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the guelph permeameter. *Soil Science* 140, 299-302.
- Ribón, C., Salgado, G., Palma, L., Lagunes, E., 2003. Propiedades químicas y físicas de un vertisol cultivado con caña de azúcar. *Interciencia*, vol: 8 No: 3
- Robichaud, P., 2000. Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountain forests, USA. *Journal of Hydrology* 231, 220–229
- Rodríguez, C., Daza O., 1995. Preparación de suelos. CENICAÑA el cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, Cali. 109-114.
- Rzedowski, J., 2006. Vegetación de México. 1º ed. digital. CONABIO. México.
- SAGARPA 2013. Importancia de la agroindustria de la caña de azúcar. México.
- Sánchez, G., Ortiz, S., Gutierrez, C., Gómez, J., 2002. Clasificación campesina de tierras y su relación con la producción de caña de azúcar en el sur de Veracruz. *Terra* 20:359-369

- Sánchez, H., Ordaz, C., Benedicto, V., Hidalgo, M., Palma, L., 2005. cambios en las propiedades físicas de un suelo arcilloso por aportes de lombricompost de cachaza y estiércol. *Interciencia Caracas, Venezuela* pp. 775-779.
- Salgado, G., Palma, L., Lagunes, E., Ortíz, G., Ascencio, R., 2005. Bases para generar un programa de fertilización en un ingenio de Tabasco, México. *INCI Vol:30 No:7*
- Schoeneberger P., Wysocki D., Benham E., y Broderson W., 2002. Field book for describing and sampling soils, Version 2.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- SEMARNAT 2002. NOM-021- SEMARNAT -2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación México.
- SEMARNAT 2005.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP).2014. Consultado el 26 junio 2017. en <http://www.gob.mx/siap/>
- Shaxson, F., Barber, R., 2005. Optimización de la Humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo. *Boletín de suelos de la FAO* 79.
- Soto, B., Benito, E., Diaz-Fierros, F., 1991. Heat-induced degradation processes in forest soils. *International Journal of Wildland Fire* 1, 147–152.
- Stoof, R., Wesseling, G., Ritsema, J., 2010. Effects of fire and ash on soil water retention. *Geoderma*, 159, 276–285.
- Teague, W., Dowhower, S., Baker, S., Ansley, R., Kreuter, U., Conover, D., *et al.* 2010. Soil and herbaceous plant responses to summer patch burns under continuous and rotational grazing. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 137, 113–123.
- Tessler, N., Wittenberg, L., Malkinson, D., Greenbaum, N., 2008. Fire effects and short-term changes in soil water repellency – Mt. Carmel, Israel. *Catena* 74, 185–191
- Thomaz, E., 2017 Fire changes the larger aggregate size classes in slash-and-burn agricultural systems. *Soil & Tillage Research*, 165, 210–217
- UNESCO, 2005. Evaluación de Parámetros y Procesos Hidrológicos en el Suelo. Documentos Técnicos en Hidrología del PHI, número de serie 71.
- USDA, 2008. Soil Quality Indicators. Natural Resources Conservation Service.
- Van Reeuwijk (1999).
- Viveros, C., Calderón, H. 1995. Siembra. En: CENICAÑA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, Cali. 131-139

- Vivianco, J., Bojórquez, J., Murray, R., Nájera, O., Hernández, A., Flores, F., 2010. Caracterización de los principales suelos de la cuenca del río Mololoa, Tepic, Nayarit, México. *Cultivos tropicales* Vol:31 No:1 32-40
- WRB 2014. IUSS Working Group. World Reference Base for Soil Resources.
- Yang, J., Liu, J., Hu, W., Li, X., Wang, Y., Li, H., 2013. Changes of soil organic carbon, nitrogen and phosphorous concentrations under different land uses in marshes of Sanjiang Plain. *Acta Ecológica Sinica* 33, 332-337
- Zapata, R., 2004. Química de la acidez del suelo. Universidad Nacional de Colombia Medellín. Cap. 2.
- Zérega, M., Hernández, T., Valladares, J. 1998. Efectos de la labranza sobre el suelo y en el cultivo de la caña de azúcar a corto plazo. *Agronomía Tropical* Vol:48 No:4 501-513
- Zimmermann, B., Elsenbeer H., De Moraes, J., 2006. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. *Forest Ecology and Management* 222, 29–38