



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**EFFECTOS DEL FUEGO SOBRE LAS PROPIEDADES
HÍDRICAS DEL SUELO DEL BOSQUE TROPICAL
PERENNIFOLIO EN LA REGIÓN LACANDONA,
CHIAPAS.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGO

P R E S E N T A:

JUAN ANTONIO POBLANO OLIVARES

**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. EFRAÍN R. ÁNGELES CERVANTES**

PROYECTO: UNAM PAPIIT IN 217308

MÉXICO, D.F.

SEPTIEMBRE 2013



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México que a través del Proyecto **PAPIIT-UNAM IN 217308** permitió la realización de esta tesis.

Al laboratorio de Génesis y Clasificación de Suelos del COLPOS y al Laboratorio de Ecohidrología de Bosques y Selvas de la F.E.S. Zaragoza, U.N.A.M. por las facilidades para la realización de los análisis micromorfológicos, físicos y químicos de esta tesis.

Al ecólogo y Dr. en Ciencias Efraín Reyes Ángeles Cervantes, por permitirme ser parte de su equipo de trabajo; por compartir su cariño, pasión y dedicación a la academia y a la enseñanza de la ecología en la UNAM y sobre todo por ayudarme cuando más lo requería.

A los Dr. Arcadio Monroy Ata, Dr. Gerardo Cruz Flores y a la M. en C. Sonia Rojas por sus comentarios y sugerencias para la mejora de esta tesis.

A mis compañeros de trabajo en campo y laboratorio: M. en C. Enrique Suástegui, Biól. Tania González, Biól. Janelle Sacnité Chávez, Biól. Diana Jiménez, Biól. Manuel Castro, Biól. Francisco Cohetero, Biól. Mariana Zamudio, Nahúm Roldan, Guillermo Vázquez, Alejandra Sevilla Salcedo y Rebeca Cedillo por su invaluable ayuda.

A los Profesores María de los Ángeles Galván V. y Alejandro Tecpa Jiménez por sus enseñanzas; por su interés en mi formación académica y profesional y por ayudarme a descubrir caminos y construir puentes en mi desarrollo personal.

A la Biól. Adriana Vallejo Fernández por permitirme estar al lado suyo en esta etapa de mi vida. Gracias por permite ser partícipe de tu gran amor por la Biología.

A Pablo Chankin Najbor y familia, responsables del Centro Ecoturístico de Autogestión Comunitaria “Tres Lagunas”, Región Lacandona, Chiapas, por las facilidades brindadas en campo para la realización de este trabajo.

A la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) por facilitar las poligonales de los acuíferos en el estado de Chiapas.

A mis amig@s por su amistad y tiempo: Adriana, Mario, Itzel, Leo, Misa, Anayeli, Caty, Landy, Memo, Ángel, Alejandra Sevilla, Nahúm, Tanita, Sacny, Dianita, Mariana, Juanito, Eli, Sandy, Jonathan, Cíndel, Daniel, Jessica, Karla, Norma, Vero, Azucena, Susana, Nelly, Yoshi, Nube y Eve.

DEDICATORIA

A mis amados padres: Rosaura Olivares C. y Antonio Poblano F. por regalarme dos veces la vida. Por todas las hermosas experiencias juntos y por brindarme la gran dicha de integrar una hermosa familia, pero sobre todo por cobijarme con su gran amor.

A mis adorados abuelitos, seres esenciales y ejemplares en mi vida: Juanita Contreras[†], Chelita Fernández, Betito Olivares y Juanito Poblano[†].

A mi hermano Omar Poblano O. por estar conmigo siempre. Por su fortaleza, su ejemplo y su cariño.

A la familia Poblano Clavel por el afecto y apoyo en cada momento.

A mis tíos, primos y sobrinos, por los momentos de convivencia, las sonrisas y el apoyo durante todo este tiempo.

A Adrita Vallejo y a Monsesita Villa por permitirme existir en sus vidas. Las amo.

Al estimado Dr. Efraín Ángeles, compañeros y personal de apoyo que hicieron posible esta tesis.

A tí.

ÍNDICE

	Página
Resumen	
Introducción.....	2
Marco Teórico.....	4
Antecedentes.....	8
Interrogantes.....	13
Objetivos.....	14
Diseño Metodológico.....	15
Resultados.....	21
Discusión.....	32
Conclusiones.....	36
Literatura Citada.....	37

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Efectos del sistema RTQ sobre las propiedades hídricas del suelo.....	24
2	Efectos del sistema RTQ sobre las propiedades químicas del suelo.....	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Distribución del BTP en México.....	4
2	Ubicación del CEAGC “Tres Lagunas” en la Región Lacandona.....	15
3	Imágenes de los sitios de muestreo.....	16
4	Efectos del sistema RTQ sobre las propiedades hídricas del suelo.....	26
5	Efectos del sistema RTQ sobre las propiedades químicas del suelo.....	28
6	Microfotografía del BTP.....	30
7	Microfotografía del ACH5 meses.....	30
8	Microfotografía del ACH12 meses.....	31
9	Microfotografía del ACH60 meses.....	31
10	Relación entre los macro y microagregados con la porosidad del suelo.....	33

RESUMEN

El bosque tropical perennifolio (BTP) ocupa 75% de la superficie total de la región Lacandona, localizada en la cuenca hidrológica Grijalva-Usumacinta, primera reserva de agua en México, tercera continental y séptima mundial. En estos BTP se utiliza el fuego con fines agrícolas a través del sistema roza-tumba-quema (RTQ), sin embargo se desconocen sus efectos sobre las propiedades hídricas y la micromorfología del suelo. Por lo anterior, los objetivos de este trabajo fueron: 1) evaluar las propiedades hídricas del suelo del BTP y de acahuales de 5 (ACH5), 12 (ACH12) y 60 (ACH60) meses ; 2) evaluar los efectos que provoca el fuego del sistema RTQ sobre las propiedades hídricas, químicas y físicas del suelo. El estudio se realizó en la CEAGC “Tres Lagunas”, en la región Lacandona de Chiapas. Se eligieron 5 puntos dentro del BTP y 3 puntos en cada acahual de diferente edad. En cada punto se realizaron de 3 a 4 registros de Conductividad hidráulica (K_{fs}), Tasa de infiltración superficial (R_2), Tasa de infiltración a 5 cm de profundidad (R_1), y Potencial de flujo matricio (Φ_m) con el permeámetro Guelph 2800KI[®], mientras que la temperatura (°C) y la humedad relativa del suelo se registraron con el humedímetro Kelway[®]. En cada registro se tomó una muestra de suelo de 0 a 5cm para realizar análisis químicos, según la NOM-021-SEMARNAT-2000, asimismo también se tomaron muestra en cajas tipo Kubiena para determinar porosidad a través de secciones delgadas. Los resultados mostraron que el BTP registró una K_{fs} de $0.038 (\pm 0.027) \text{ cm} \cdot \text{seg}^{-1}$, R_2 de $30 (\pm 21.54) \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$, y Φ_m de $0.29 (\pm 0.34) \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$. No se detectaron diferencias significativas entre las propiedades hídricas, físicas y químicas entre suelos del BTP y los de acahuales. Con base en lo anterior se concluye que el uso del fuego a través del sistema RTQ practicado en esta región, no afecta las propiedades hídricas, físicas y químicas del suelo. Los elevados valores de infiltración, porosidad y conductividad hidráulica, así como de nutrimentos del suelo, permiten inferir que este sistema es sustentable y explican la elevada recarga de agua dentro de la principal cuenca hidrológica de México. Se recomienda desarrollar investigaciones en acahuales de mayor edad para sustentar ecológicamente leyes y planes de manejo en estos ecosistemas tropicales.

Palabras clave: *región Lacandona, propiedades hídricas, bosque tropical perennifolio, conductividad hidráulica, roza-tumba-quema.*

INTRODUCCIÓN

El uso del fuego a través de la técnica agrícola de roza-tumba-quema (RTQ) es una práctica común en los bosques tropicales perennifolios (BTP) de la región Lacandona, México. Este sistema se practica en trescientos millones de hectáreas de suelos tropicales alrededor del mundo (Joseph y Michelle, 2007; Moya-García *et al.*, 2003 y Crutzen y Andreae, 1990), debido a que es el medio más económico, fácil y rápido para despojar del terreno los residuos producto de la roza (Hernández-Xolocotzi, 1985; De Bano *et al.*, 1998 y Neary *et al.*, 2005).

El uso del fuego y el sistema RTQ han desencadenado un intenso debate en materia de política ambiental pública en México y existe un artículo de ley que restringe su uso (LGEEPA, 2011), sin embargo, autores como Chávez (2011), Zamudio (2011), Are *et al.*, (2009), Alegre y Cassel (1996) y Gómez-Pompa (1987), consideran que este sistema representa el manejo sustentable de los suelos selváticos. La importancia de las selvas en el ciclo hidrológico en las grandes cuencas se ha reconocido pero se desconocen los efectos del fuego sobre las propiedades hídricas de sus suelos.

Las propiedades hídricas hacen referencia a la capacidad del suelo para retener y permitir el flujo de agua a través de sí (Carter y Gregorich, 2008), y los estudios micromorfológicos permiten relacionar la porosidad y la estructura del suelo con los flujos preferenciales de agua dentro del mismo (Kutílek *et al.*, 2007; Fitzpatrick, 1990 y Bouma, 1980).

La región Lacandona y sus BTP se ubican dentro de la región hidrológica Grijalva-Usumacinta, considerada primera reserva de agua a nivel nacional y séptima a nivel mundial (DOF, 2007). En este BTP, con 12,988 km² de superficie, se encuentra la mayor riqueza biológica de México, y los árboles más altos del mundo (60 m promedio); sus precipitaciones se registran entre las más altas del país (CONABIO, 2012) y sus suelos recargan agua al acuífero más extenso de Chiapas denominado “Ocosingo”, sin embargo, la cuantificación de las propiedades hídricas y las características micromorfológicas así como los efectos que provoca el fuego cuando se aplica el sistema RTQ sobre sus suelos se encuentran escasamente documentados en la literatura.

Por lo anterior y debido a la importancia de la principal región captadora de agua de México, se plantearon las siguientes interrogantes: 1) ¿Que valores de las propiedades hídricas presenta el suelo del BTP de la región Lacandona?, 2) ¿El sistema RTQ afecta estas propiedades? y; 3) ¿El proceso de recuperación de la selva o el desarrollo de acahuales recupera las propiedades hídricas y químicas del suelo?

Las respuestas a estas interrogantes permitirán tener mayores fundamentos ecológicos en la modificación o aplicación de leyes sobre las prácticas tradicionales de manejo de recursos naturales.

MARCO TEÓRICO

El Bosque tropical perennifolio (BTP)

La selva alta perennifolia o BTP, es la comunidad vegetal más exuberante de las zonas tropicales de México; el dosel arbóreo sobrepasa los 30m de altura y más del 75% de las especies conservan las hojas todo el año (perennes). Ocupa 1.4184 millones de hectáreas de la superficie total de México (CONABIO, 2010) y se distribuye principalmente entre los estados San Luís Potosí, norte de Hidalgo, Oaxaca, Veracruz, Chiapas y Tabasco (Figura 1), en zonas donde la precipitación promedio es superior a los 2,000 mm anuales y la temperatura es por lo general mayor de 18°C. La mayor parte de los BTP crecen sobre rocas calizas que forman “karst” por lo que el agua escurre por grietas directamente al subsuelo (Pennington y Sarukhán, 2005; CONABIO, 2012).

Los bosques tropicales ocupan una décima parte de área del mundo y son muy importantes en los ciclos biogeoquímicos terrestres y como hábitat de más de la mitad de especies registradas globalmente. Las investigaciones sobre esos ecosistemas, se han enfocado sobre todo en los mecanismos para el mantenimiento de la alta diversidad y sus respuestas a la fragmentación, la explotación forestal y otros impactos humanos.

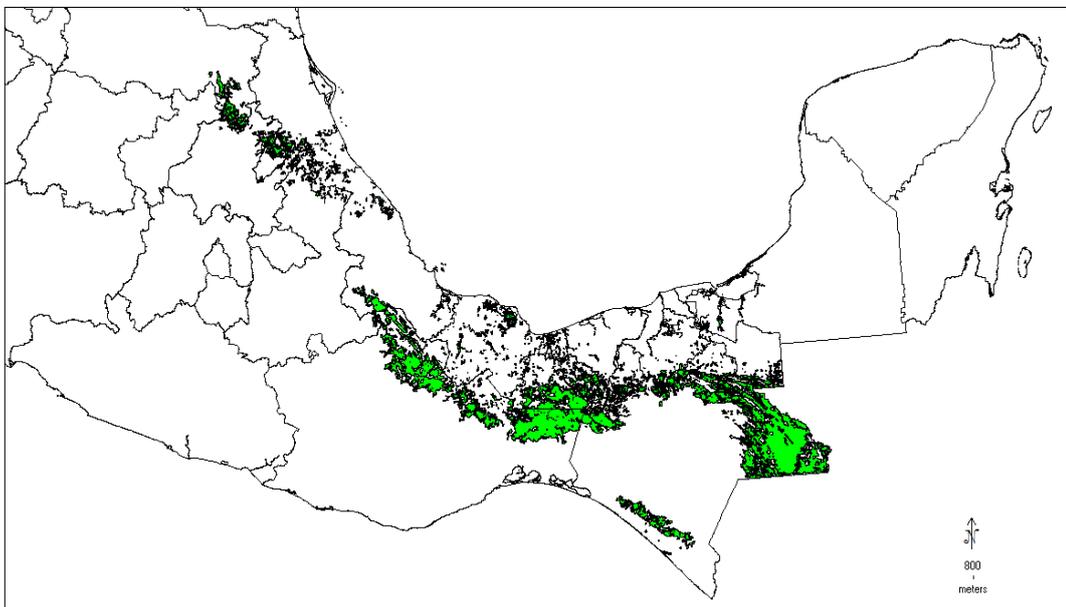


Figura. 1. Distribución del BTP en México (verde).

Los procesos hidrodinámicos del suelo

Para Giertz *et al.*, (2005) y Kútilek y Nielsen (2007) los procesos hidrodinámicos (flujo y retención de agua) dentro del suelo del BTP son claves dentro del ciclo hidrológico de la corteza terrestre, sin embargo, son poco comprendidos. Randall *et al.*, (2005) mencionan que los flujos hídricos dentro del suelo facilitan la disolución de los minerales, el transporte de iones y coloides y de complejos orgánometalicos hacia capas más profundas además de permitir el desarrollo de la vegetación.

Importancia de la región Grijalva-Usumacinta

Esta región se caracteriza por poseer suelos de tipo rendzínico, gleysoles, luvisoles, vertisoles, litosoles y acrisoles (INEGI, 2000). Cuenta con una extensión territorial continental de 102, 465 km² y abarca los estados de Chiapas y Tabasco; su precipitación normal anual es de 1,709 mm y su escurrimiento natural medio superficial total es de 117, 396 hm³·año⁻¹; alberga 83 cuencas hidrológicas, 21 acuíferos no sobre explotados y dos de los ríos más caudalosos de México: el Grijalva y el Usumacinta que juntos escurren superficialmente 71, 716 millones de m³·año⁻¹ con una longitud de 1, 521 km (CONAGUA, 2012). Geissert *et al.*, (2012) mencionan que los suelos forestales son fundamentales para el adecuado funcionamiento hidrológico de las cuencas y en la producción de agua limpia, sin embargo, los procesos hidrodinámicos que se desarrollan dentro del suelo de la principal región hidrológica de México, Grijalva-Usumacinta, no se han evaluado.

Las propiedades hídricas y su relación con la micromorfología del suelo

Para comprender los procesos hidrodinámicos de los suelos en condiciones naturales o bajo algún grado de perturbación antropogénica (Angulo-Jaramillo *et al.*, 2000) se evalúan las propiedades hídricas en la zona insaturada, tales como: tasa de infiltración, conductividad hidráulica saturada, potencial de flujo mátrico (Carter y Gregorich, 2008) y físicas como: porcentaje de humedad relativa, contenido de humedad y densidad aparente. Algunas de estas propiedades (tasa de infiltración, conductividad hidráulica y densidad aparente) son altamente sensibles a los cambios en la estructura del suelo provocados por los disturbios (Alegre y Cassel, 1996; Zhou *et al.*, 2007 y Schoenholtz *et al.*, 2000).

Las técnicas micromorfológicas tienen por objetivo el estudio de materiales no perturbados como sedimentos, rocas no consolidadas o diferentes tipos de suelo a través del análisis de cortes finos o secciones delgadas con metodologías submicroscópicas (Lowell, 1990). Estos cortes identifican problemas en el uso de los suelos (Fitzpatrick, 1990) y permiten observar cambios en su estructura. Además, muestran el ordenamiento, tamaño y composición de las partículas minerales del suelo. Los estudios micromorfológicos permiten analizar la relación entre la porosidad (natural o inducida) y los agregados (macro y microagregados) con los procesos hidrológicos en la zona insaturada del suelo a través del enfoque hidropedológico (Kútílek y Nielsen, 2007).

El uso del fuego dentro del sistema RTQ en los BTP.

El fuego es una reacción química que libera energía en forma de luz y calor (Cochrane, 2003; Brown *et al.*, 2009; RAE, 2012) y es el principal componente de los incendios. Para Bond y Keeley (2005) el fuego transforma moléculas orgánicas complejas a productos orgánicos y minerales más simples.

En el registro geológico, se ha registrado desde el Silúrico hace aproximadamente 400 millones de años (Bowman *et al.*, 2009). Bond y Keeley (2005) mencionan que el fuego es una “fuerza evolutiva significativa” que influye en los procesos y patrones globales como son la estructura y distribución de la vegetación, los ciclos biogeoquímicos de los elementos y el clima.

En numerosas culturas antiguas, el fuego jugó un papel muy importante dentro de su desarrollo social (Pyne, 2001; Juárez y Cano, 2007) pues les permitió entre otras cosas, la manipulación de los materiales para la producción de cerámica y metales (Brown *et al.*, 2009). Además, lo utilizaron como una herramienta en el manejo de una amplia gama de ecosistemas naturales (Neary *et al.*, 2005). Tal herramienta se potencializó cuando la humanidad comenzó a tener control sobre la ignición: las poblaciones lograron iniciar y dentro de sus posibilidades, detener el fuego (Pyne, 2010). Esta habilidad de los humanos para manipular el fuego y el paisaje fue incrementando al pasar el tiempo, sin embargo, el impacto y consecuencias sobre la biodiversidad y la biogeoquímica, así como la modificación de su propio régimen, son cuestionados en la actualidad (Archibald *et al.*, 2012).

La utilidad del fuego en la agricultura no es la excepción; se utiliza en las quemas controladas de las prácticas agrícolas tradicionales de roza-tumba-quema (RTQ). Existen diferentes “modalidades” de ésta técnica agrícola, sin embargo, se retoman las descripciones hechas por Hernández-Xolocotzi (1985) y Gómez-Pompa (1985): el sistema RTQ consiste en elegir las especies arbóreas útiles dentro del sitio destinado al cultivo; los mejores individuos se protegen y permanecen en pie; enseguida, el agricultor realiza una selección masiva de especies útiles (vegetación secundaria de rápido crecimiento); las identifica y las “roza” a una altura de 15 a 50 cm aproximadamente. Los árboles gruesos se tumban dejando tocones de 15 cm. Una vez seca la vegetación, se quema para abrir espacio a la siembra, sin desarrollarse labranza alguna. Por último, se cultivan anualmente los terrenos por dos, tres o cinco años para posteriormente dejarlos en reposo (barbecho) durante 20, 40 ó más años.

Actualmente, existe una controversia científica respecto a los efectos que provoca el sistema RTQ sobre los ecosistemas tropicales:

Por una parte, se le adjudica a este sistema la degradación ambiental y fisicoquímica de los suelos (SEMARNAT, 2008); se le etiqueta de ecológicamente destructivo y se le usa como sinónimo de deforestación. Se le relaciona, además, con la pérdida de la biodiversidad (SEMARNAT, 2003a, 2008b; Eastmond y Faust, 2006). La SEMARNAT establece que el crecimiento de las fronteras agrícolas y pecuarias está determinado en un 75 y 25% respectivamente, por la agricultura de RTQ. Hernández- Xolocotzi (1985) menciona que la introducción de pastizales, después de las prácticas agrícolas provocan un problema ecológico mayor: el pastoreo extensivo.

La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente establece en su artículo 101 que en las zonas selváticas se deberá realizar el cambio progresivo de la practica RTQ “*a otras que no impliquen deterioro de los ecosistemas, o de aquellas que no permitan su regeneración natural o que alteren los procesos de sucesión ecológica*” (LGEEPA, 2011).

Con un enfoque diferente, el sistema RTQ se le relaciona con la sustentabilidad agrícola cuando las densidades poblacionales humanas son bajas y los ciclos de barbecho son largos (Gómez-Pompa, 1985; Hernández-Xolocotzi, 1985; Juo y Manu, 1996; Alegre y Cassel, 1996 y Are *et al.*, 2009).

Para Gómez-Pompa (1985) el sistema RTQ está perfectamente adaptado a la delicada dinámica de nutrientes y agua en los ecosistemas tropicales, además considera que la problemática esencial de este sistema agrícola tradicional, radica principalmente, en las malas prácticas de manejo, el uso de tecnología incorrecta y la falta de una amplia consideración ecológica en la planeación de los usos de suelo.

ANTECEDENTES.

Registros de las propiedades hídricas y físicas del BTP en México y el Mundo.

Tasa de Infiltración R_1, R_2 ($cm \cdot min^{-1}$). Es la velocidad con que ocurre el proceso de infiltración de agua a través del suelo (Gómez-Tagle, 2008). Cuantitativamente es el volumen de agua que entra en el suelo por unidad de área y tiempo cuando se expone a una inundación superficial. La infiltración es un proceso clave del ciclo hidrológico y determinante en los servicios ambientales hidrológicos proporcionados por los ecosistemas terrestres a diferentes escalas (Gómez-Tagle, 2008). Instrumentos como los infiltrómetros de doble anillo o de tensión evalúan esta propiedad. Al respecto, Alegre y Cassel (1996) registraron una tasa de infiltración de $1.35 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ en un bosque tropical de Perú; mientras que Zimmerman *et al.*, (2006) registraron $2.55 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ en Rhodonia, Amazonía brasileña; y Chávez (2011) registró una infiltración de $23.4 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ en el bosque tropical perennifolio en la cuenca del Papaloapan, Oaxaca, México.

Conductividad hidráulica saturada en campo, K_{fs} ($cm \cdot seg^{-1}$). Es un coeficiente matemático (K) que relaciona la tasa de movimiento de agua respecto a un gradiente hidráulico; cuantifica la capacidad de un material para transmitir agua bajo condiciones y unidades estandarizadas de presión, longitud o área (USDA, 2012). Cuando la K se mide bajo condiciones saturadas de agua se denota como K_s o K_{sat} y se denomina conductividad hidráulica saturada (USDA, 2012; Summer *et al.*, 2000). Cuando la K_{sat} se mide *in situ* y los poros que conducen agua dentro del suelo contienen aire encapsulado se aplica el término K_{fs} o conductividad hidráulica saturada en campo (Carter y Gregorich, 2008). Esta propiedad es considerada como la evaluación más próxima de lo que ocurre en el suelo cuando existe una precipitación natural (Gómez-Tagle, 2008) y puede ser cuantificada por instrumentos como el amozómetro y el permeámetro Guelph.

Al respecto, el valor más bajo registrado de k_{fs} fue de $1.97 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{seg}^{-1}$ en un bosque tropical de Camboya (Toriyama *et al.* 2013). Atribuyeron este valor a la existencia de sustancias repelentes al agua dentro del suelo. Por su parte, Mendoza-Vega y Messing (2005), Céledon-Muñíz (2006), Zimmerman *et al.*, (2006) y Are *et al.*, (2009) registraron valores medios de k_{fs} de $1.11 \cdot 10^{-3}$, $2.7 \cdot 10^{-3}$, $5.72 \cdot 10^{-3}$ y $8.9 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{seg}^{-1}$. Éstos últimos atribuyen sus valores a la porosidad del suelo, mientras que Mendoza-Vega y Messing (2005) mencionan que estos valores son los causantes de inundaciones y de las condiciones anaerobias en el suelo. Finalmente, Ziegler *et al.* (2006) y Chávez (2011) registraron valores altos de k_{fs} de $4 \cdot 10^{-2}$ y $3.8 \cdot 10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{seg}^{-1}$ en bosques tropicales de Malasia y Oaxaca, México, respectivamente. El primer autor le atribuye este valor a las capas gruesas de raíces y otras actividades bióticas cerca de la superficie del suelo, mientras que el segundo autor, atribuye sus resultados a la elevada porosidad del suelo debido a la presencia del catión calcio y a la gran actividad biológica.

Potencial mátrico Φ_m ($\text{cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$). Es la capacidad del suelo para retener agua cuando ésta atraviesa una sección de área por unidad de tiempo. Su valor se incrementa debido a las múltiples fuerzas electrostáticas de la matriz del suelo para atraer agua cuando se encuentra saturado (Carter y Gregorich, 2008), y juega un importante papel en la regulación de la dinámica de todos los organismos del suelo (McGover *et al.*, 2001). Esta propiedad puede ser evaluada en campo con el permeámetro Guelph. Las evaluaciones *in situ* en los bosques tropicales son escasas excepto las registradas por Chávez (2011) donde registró un valor de $0.33 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$.

Porosidad total (%). El medio poroso del suelo permite cuantificar la relación de la estructura con las propiedades hídricas del suelo (Kútílek y Nielsen 2007). Ruy y Cabidoche (1998) definen tres tipos de porosidad: 1) fisuras verticales, caracterizadas por los poros finos de estructura larga en los cuales los flujos de agua son muy rápidos; 2) porosidad mátrica, compuesta por los poros finos que se forman por el arreglo de las partículas arcillosas; contienen o almacenan el agua responsable de su propio movimiento dentro del suelo y; 3) porosidad estructural, conformada por la macro y mesoporosidad. Este tipo de porosidad es el resultado de la actividad microbiana, la mesofauna y las raíces. Mendoza-Vega y Messing (2005) registraron una porosidad del 66% en suelos del BTP en la región lacandona, Chiapas. Atribuyen estos valores a la buena estructura del suelo. Are *et al.*, (2009) registraron una porosidad total de 56% en un bosque tropical secundario en Nigeria y Chávez (2011) registró una porosidad total

del 65.09% en el BTP de la cuenca del Papaloapan, Oaxaca con técnicas micromorfológicas.

Densidad aparente ($g \cdot cm^{-3}$). Es la masa por unidad de volumen de un suelo que se ha secado a peso constante a 105 °C. Se cuantifica a través de muestras inalteradas de suelo por medio de un cilindro de volumen conocido (SEMARNAT, 2001) y permite monitorear el grado de compactación de un suelo (Schoenholtz *et al.*, 2000). Toriyama *et al.*, (2013) registró una densidad de $1.41 g \cdot cm^{-3}$ en un BTP de Camboya, en tanto que Céledon-Muñiz (2006) registró una densidad de $1.13 g \cdot cm^{-3}$ en BTP de Chiapas, un valor similar fue obtenido por Are *et al.*, (2009) en un bosque tropical de Nigeria. Valores menores fueron registrados por Chávez Barrera (2011) de $0.54 g \cdot cm^{-3}$ en suelos de BTP Oaxaca y Mendoza-Vega y Messing (2005) de $0.9 g \cdot cm^{-3}$ BTP en Chiapas, México.

Contenido de humedad del suelo (%). Se basa en la medición de la cantidad de agua expresada en gramos multiplicada por cien que contiene una muestra de suelo. Su determinación es la relación de pesos entre la masa de suelo húmedo y la masa de suelo seco. Se considera como suelo seco aquél que se ha sometido a un proceso de secado en la estufa a 105°C hasta un peso constante (SEMARNAT, 2001). Chávez (2011) registró un valor del 40.10% en el BTP de la cuenca Papaloapan, Oaxaca, México.

Humedad relativa del suelo (%). Se entiende como la capacidad de campo expresada en porcentaje. Esta capacidad se define como la cantidad de humedad que un suelo retiene contra la gravedad cuando se deja drenar libremente (Muñoz-Iniestra *et al.*, 2000). El humidímetro Kelway® permite obtener de forma sencilla y confiable el porcentaje de humedad relativa. Chávez (2011) registró 49.16% de humedad a saturación relativa en el BTP en Oaxaca, México.

Temperatura T, (°C). La temperatura del suelo refleja las variaciones diurnas y estacionales, es decir, las condiciones climáticas dentro del suelo (Neary *et al.*, 1999). Se relaciona directamente con el crecimiento de las plantas y con la actividad biológica del suelo. De igual manera, influye en el movimiento de la humedad a través de la matriz del suelo (Randall *et al.*, 2005). Existen varios instrumentos para medir esta propiedad, sin embargo, usualmente se utiliza para evaluaciones en campo o *in situ* termómetros para sólidos. Ramírez y Moreno (2008), registraron una variación anual de 21 a 25 °C en un BTP de Colombia. La temperatura más baja registrada por ellos fue en el mes de Noviembre y la más elevada en Marzo.

Efectos del sistema RTQ sobre las propiedades hídricas y físicas del suelo del BTP en México y el mundo.

Infiltración. La aplicación del sistema RTQ genera varias respuestas. Alegre y Cassel (1996) mencionan que la infiltración se incrementó en el suelo cuando se aplicó el sistema RTQ en comparación al aclareo realizado con maquinaria. Consideran que el uso de equipo pesado degrada la estructura del suelo e incrementa la densidad aparente. Por su parte, Are *et al.*, (2009) registraron una disminución significativa del 52% en la tasa de infiltración en un bosque tropical nigeriano posterior a la aplicación del fuego y atribuyen esta disminución a la obstrucción de la macroporosidad por los residuos de ceniza. Sin embargo Chávez (2011) no detectó diferencias significativas en dos acahuales de diferentes edades (4 y 25 años) respectivamente, establecidos bajo el sistema RTQ en Oaxaca, México.

Conductividad hidráulica. Are *et al.*, (2009) registraron una conductividad hidráulica de $4.69 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{seg}^{-1}$, lo que significó una disminución del 47% respecto al valor registrado antes de la quema en un suelo del bosque tropical secundario nigeriano; atribuyen esta reducción a los depósitos de ceniza sobre la macroporosidad. Chávez-Barrera (2011), obtuvo valores de $3.1 \cdot 10^{-1}$ y $3 \cdot 10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{seg}^{-1}$ en acahuales de diferentes edades establecidos mediante el sistema RTQ, y no detectó diferencias significativas respecto al valor obtenido en suelos del BTP conservado en Oaxaca, México; atribuye este comportamiento a la alta porosidad que se encuentra en el suelo.

Potencial de flujo matrico. Para el caso del Potencial de flujo mátrico Chávez-Barrera (2011) registró valores en suelos de acahuales establecidos bajo el sistema RTQ de 0.10 y 0.03 $\text{cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$ sin detectar diferencias significativas con respecto al BTP. Sin embargo Are *et al.* (2009) registraron un valor de $51.4 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1/2}$, o sea una reducción del 58% posterior a la aplicación de la quema en un bosque tropical secundario en Nigeria.

Porosidad total. Hernández-Xolocotzi (1985) mencionó que el calor del fuego “afloja” el suelo como resultado de la formación de vapor en su superficie, además de incrementar la porosidad de la laja calcárea debido a la exposición al fuego. Are *et al.*, (2009) registraron reducciones del 10% en la porosidad total, 18% en la macroporosidad y del 6% en la microporosidad respecto al suelo del bosque tropical secundario, sin embargo, no se detectaron diferencias significativas posterior a la aplicación de la quema. Resultados similares fueron encontrados por Chávez (2011) quien registró una

reducción de la porosidad, en dos acahuals de diferentes edades, del 9 y 13% respectivamente, sin embargo no detectó diferencias significativas con respecto al suelo del BTP. Atribuyó este comportamiento a la elevada estabilidad en la porosidad debido a la gran actividad biológica y a las altas concentraciones de calcio.

Densidad aparente. Are *et al.*, (2009) registraron un incremento del 4% en la densidad aparente. Atribuyen este hecho a la perturbación en los agregados del suelo y a la pérdida de la materia orgánica después de la quema. Chávez Barrera (2011) registró un incremento del 14% en dos acahuals establecidos bajo el sistema RTQ en Oaxaca, sin embargo, no detectó diferencias significativas.

INTERROGANTES.

Con base en la información señalada anteriormente se muestran que existe controversia en los efectos del fuego en suelos tropicales, por lo que surgen las siguientes interrogantes:

- ¿Qué valores presentan las propiedades hídricas del suelo del BTP de la región Lacandona?,
- ¿El sistema RTQ afecta las propiedades hídricas del suelo del BTP en la región Lacandona?
- ¿El proceso de recuperación del BTP o desarrollo de acahuals recupera las propiedades hídricas y químicas del suelo?

Las respuestas a estas interrogantes permitirán comprender los efectos que provoca el sistema RTQ y la ecohidrología del suelo del BTP, lo cual es necesario para mejorar la legislación al respecto y poder emitir recomendaciones sobre este sistema que ha permitido el mantenimiento de etnias en el sureste mexicano.

OBJETIVOS

General:

- Evaluar las propiedades hídricas del suelo del BTP y acahuales de diferente edad, afectados por el sistema tradicional de RTQ en la región Lacandona, Chiapas.

Particulares:

- Estimar las siguientes propiedades hídricas: la tasa de infiltración ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$), conductividad hidráulica saturada en campo ($\text{cm}\cdot\text{seg}^{-1}$), potencial mátrico ($\text{cm}^2\cdot\text{seg}^{-1}$), distribución de agregados (%), humedad del suelo (%), densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) y humedad relativa (%), del suelo del BTP y acahuales de la región Lacandona, Chiapas.
- Evaluar los efectos que provoca el fuego del sistema RTQ sobre estas propiedades hídricas y la porosidad total (%) del suelo del BTP y Acahuales, por medio de análisis micromorfológicos.

DISEÑO METODOLÓGICO

Zona de estudio. Se ubica en la localidad de San Javier, municipio de Ocosingo al oriente del estado de Chiapas, entre las coordenadas extremas 16°50'45" a 16°49'48" Lat. N y 91°08'53" a 91°08'44" Long. O, dentro del Centro Ecoturístico de Autogestión Comunitaria (CEAGC) “Tres Lagunas” en la región Lacandona (Figura 2).

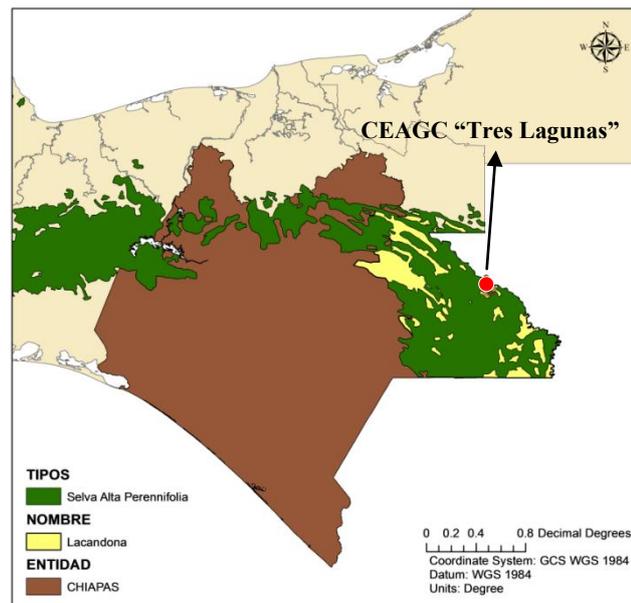


Figura 2. Ubicación del CEAGC “Tres Lagunas” (rojo) en Ocosingo, Chiapas dentro de la región Lacandona (amarillo) y el BTP (verde).

Clima. Es cálido húmedo, con temperatura media anual mayor a 22 °C y temperatura del mes más frío mayor de 18 °C (García, 1998; Arriaga, 2002). La precipitación anual es superior a los 1600 mm y la estación más seca se registra entre marzo y mayo (0 a 60 mm).

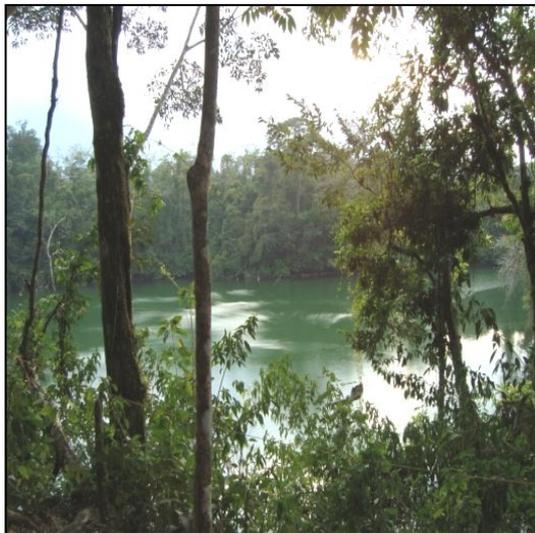
Vegetación. Domina el bosque tropical perennifolio, también conocida como Selva Alta Perennifolia, con una amplia gama de formas vegetativas; a parte de los árboles (con frecuencia superiores a los 30 m de altura) y arbustos, se observan plantas herbáceas umbrofilas y/o palmas, con frecuencia espinosas. Coexisten además, abundantes bejucos y plantas trepadoras, numerosas plantas epífitas, bromeliáceas, aráceas y orquidáceas (Pennington y Sarukhán, 2005).

Geología. La selva Lacandona se ubica sobre una columna litoestratigráfica consistente en una secuencia cretácica de calizas y lutitas cubiertas discordantemente de rocas arcillosas y lechos rojos del Eoceno (Castro Mora *et al.*, 1999).

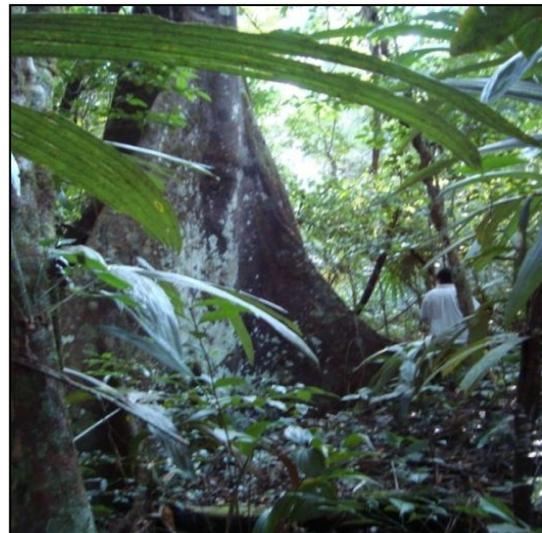
Edafología. Los suelos predominantes en los sitios de estudio son de tipo rendzínico (CENTROGEO, 2012) con características físicas favorables para la retención de agua disponible para las plantas y la aireación.

Elección de los sitios de muestreo.

Se establecieron cuatro sitios de estudio dentro del centro ecoturístico “Tres Lagunas”, Ocosingo, Chiapas: tres acahuales diferentes con edades de 5 (ACH5), 12 (ACH12) y 60 meses (ACH60) con superficie aproximada de 0.5 ha. El cuarto sitio fue el BTP conservado con 8 ha aproximadamente (Figura 3). En cada sitio se ubicaron de 3 a 4 puntos de muestreo, en cada punto se obtuvieron registros de las propiedades hídricas en dos profundidades del suelo (10 y 15 cm).

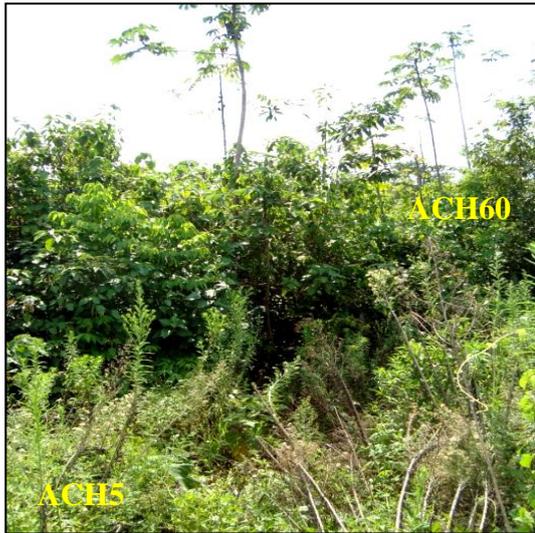


a



b

Figura 3. Imágenes de los sitios de muestreo. a y b) vegetación arbórea superior a los 30m de altura, contrafuertes desarrollados y DAP mayores a 100 cm característica del BTP.



c



d

Figura 3 (continuación). c) en primer plano se observa el ACH5 en el cual predominan herbáceas; al fondo el ACH60 con vegetación de tipo arbóreo y d) el ACH12 sucesión ecológica.

Determinación de las propiedades hídricas.

Tasa de Infiltración, R_1, R_2 ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$), conductividad hidráulica saturada en campo, K_{fs} ($\text{cm}\cdot\text{seg}^{-1}$) y potencial de flujo mátrico Φ_m ($\text{cm}^2\cdot\text{seg}^{-1}$). Se determinaron *in situ*, utilizando el permeámetro Guelph modelo 2800 KI[®] cuyo fundamento teórico emplea el principio de Mariotte. El método implica la medición de la tasa, a flujo constante, de la recarga de agua en un suelo insaturado en un orificio cilíndrico (Reynolds y Elrick, 1986). En total se realizaron 10 registros en el BTP y 5 registros, en cada acahual.

Conductividad hidráulica saturada (K_{fs}):

$$K_{fs} (\text{cm}/\text{seg}) = [(0.0041) (X) (R_2)] - [(0.0054) (X) (R_1)]$$

Potencial de flujo mátrico (Φ_m):

$$\Phi_m (\text{cm}^2/\text{seg}) = [(0.0572) (X) (R_1)] - [(0.0237) (X) (R_2)]$$

Donde:

R_1 = lectura constante a un nivel de 5 cm

R_2 = lectura constante a un nivel de 10 cm

$X = 35.22$ = constante del reservorio (proporcionada por el permeámetro)

La tasa de infiltración se registró con el permeámetro Guelph, ya que R_2 es igual a la velocidad de infiltración en la superficie.

Porosidad total del suelo (%). En cada sitio se colectaron aleatoriamente muestras de suelo con cajas tipo Kubiena. Cuatro dentro del BTP y dos para cada acahual. El método consistió en la introducción vertical de las cajas en los primeros 10 cm de suelo. Ya en laboratorio, las muestras fueron secadas a temperatura ambiente y a la sombra. Los bloques inalterados fueron impregnados con poliéster insaturado y monómeros de estireno relación 7:3 hasta su endurecimiento. Posteriormente, las muestras, fueron cortadas con un disco de punta de diamante. Los cortes finos fueron colocados en portaobjetos (6 cm x 9 cm) y pulidos hasta un grosor de 30 μ . La cuantificación del porcentaje de porosidad total de las secciones delgadas se realizó con el software IMAGE PRO PLUS® 6.0.

Distribución de agregados en el suelo (%). Se analizaron cuatro muestras del suelo del BTP y dos de cada acahual, a las profundidades de 0-2.5 cm y 2.5-5cm. El porcentaje de agregados se determinó por medio del peso total de cada muestra colectada (100%). Posteriormente, fueron pesadas las partículas agregadas y no agregadas obtenidas del tamizado con mallas número 8 (2.3 mm), 6 (3.3 mm) y 3 (6.6 mm) de acuerdo al método propuesto por Muñoz *et al.*, (2000).

Densidad aparente, D_{ap} ($g \cdot cm^{-3}$) y contenido de humedad del suelo (%). Se determinó por el método de cilindro, obteniendo tres muestras aleatorias para el BTP, dos para los ACH5m y ACH1a, y una para el ACH5a, con un cilindro de cobre de volumen conocido. Una vez en laboratorio, el secado se realizó en un horno a 105 $^{\circ}C$ hasta alcanzar el peso constante. El cálculo de la densidad aparente se realizó de acuerdo a la siguiente fórmula:

Densidad aparente:

$$D_{ap} (g \cdot cm^{-3}) = [\text{masa de suelo seco (g)}] \cdot [\text{Volumen total de suelo (cm}^{-3}\text{)}]^{-1}$$

Contenido de Humedad del suelo:

$$C. \text{ de humedad (\%)} = [\text{masa de suelo seco (g)} \cdot 100] \cdot [\text{peso inicial de suelo (g)}]^{-1}$$

Humedad relativa (%). Se determinó con el dispositivo Kelway Soil[®] desarrollado para evaluar el pH y la humedad. La metodología *in situ* consistió en introducir verticalmente el dispositivo hasta cubrir los sensores o placas metálicas con el suelo del sitio para su evaluación. Se realizaron ocho mediciones dentro del suelo del BTP y cuatro en cada acahual.

Determinación de las propiedades químicas.

En cada sitio se tomaron aleatoriamente muestras de suelo a dos profundidades (0-2.5cm y 2.5-5cm): cuatro dentro del BTP y dos para cada acahual. Las muestras fueron secadas a temperatura ambiente y tamizadas (2.3 mm). Las determinaciones fueron las siguientes: % nitrógeno total, fósforo disponible ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), % materia orgánica, pH y cationes intercambiables (Ca, Mg, Na y K, $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Nitrógeno total (%). Se realizó a través del método semi micro-Kjeldahl modificado (SEMARNAT, 2008).

Fósforo disponible ($\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$). Se determinó el fosforo extraíble por el método de Bray y Kurtz para suelos ácidos y neutros (SEMARNAT, 2008).

Materia orgánica del suelo, M.O. (%). Se evaluó a través del contenido de carbono orgánico con el método de Walkey y Black (SEMARNAT, 2008).

pH. Se determinó por el método electrométrico, el cual se basó en la determinación de la actividad el ion H^+ mediante el uso de un electrodo cuya membrana es sensible a la suspensión sobrenadante de una mezcla de suelo y agua, relación 1:5 (SEMARNAT, 2008).

Cationes intercambiables ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$). Se determinaron por el método de extracción con acetato de amonio ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1N) en pH 7. Fueron cuantificados por absorción atómica y fotometría de llama (SEMARNAT, 2008).

Análisis estadístico de datos.

Los datos obtenidos en porcentaje, como la porosidad total, agregados del suelo, humedad en peso, humedad a saturación relativa, materia orgánica y nitrógeno total, fueron transformados por medio del arco seno de la raíz cuadrada del porcentaje para ajustarlos a la distribución normal requerida para el análisis estadístico (Zar, 1999 y Reyes, 2010). Los datos de infiltración, conductividad hidráulica, potencial de flujo mátrico, Ca, Mg, Na, K, P, materia orgánica del suelo, así como los datos transformados de % humedad relativa, % humedad del suelo, densidad aparente y % distribución de agregados, se sometieron a una prueba de comparación de medias, entre los diferentes sitios de muestreo, mediante la prueba *t student*. Los datos de porosidad total se analizaron por ANOVA una vía y una prueba Scheffe (Zar, 1999; Marques, 2004; Reyes, 2010) con el software estadístico STATA®SE 8, para detectar diferencias significativas, a un nivel de 0.05 entre el bosque tropical perennifolio y los acahuales de diferentes edades.

RESULTADOS

Efectos del sistema RTQ sobre las propiedades hídricas del suelo

La conductividad hidráulica ($0.038 \text{ cm}\cdot\text{seg}^{-1}$), el porcentaje del contenido de humedad (37.08%) y el porcentaje de humedad relativa (73.75%) registrados en el suelo del BTP no mostraron diferencias significativas con los obtenidos en acahuales de diferentes edades (Cuadro 1, Figura 4f, 4i y 4j). De acuerdo con Schoeneberger *et al.*, (2002) los valores de la k_{fs} en todos los sitios de estudio son considerados como muy altos ($\geq 0.01 \text{ cm}\cdot\text{seg}^{-1}$).

Tasa de infiltración superficial R_2 . El sistema RTQ incrementó significativamente, en más del doble, la R_2 en el ACH5 ($62.4 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$; $p<0.0004$, respectivamente) y ACH60 ($72 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$; $p<0.000$) respecto al BTP ($30 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$). En ACH12 no se registraron diferencias significativas. (Cuadro 1, Figura 4e). De igual manera la R_1 se incrementó significativamente en ACH5m ($30 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$) y ACH60 ($55.2 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$) respecto al BTP ($13.62 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$).

Potencial de flujo Matrico. El sistema RTQ incrementó de manera significativa el Φ_m en el ACH60 ($0.85\pm 0.47 \text{ cm}^2\cdot\text{seg}^{-1}$; $p<0.039$) respecto al BTP ($0.29\pm 0.34 \text{ cm}^2\cdot\text{seg}^{-1}$), sin embargo, no se registraron diferencias significativas en los ACH5 y ACH12 meses (0.32 ± 0.30 y $0.30 \text{ cm}^2\cdot\text{seg}^{-1}$, respectivamente).

Porosidad total. El sistema RTQ disminuyó la porosidad total de manera significativa de 69.07 ± 7.65 registrado en el BTP a 56.78 ± 8.41 y 57.38 ± 11.36 , en los ACH12 y ACH60 respectivamente ($p<0.000$) (Cuadro 1, Figura 4a). A pesar de registrarse disminuciones significativas, la clasificación de la FAO (2009) considera a las porosidades de los sitios como muy altas.

Del mismo modo, el sistema RTQ disminuyó significativamente (Cuadro 1, figura 4b) el porcentaje de macroporos de 56.38 ± 10.96 registrado en el BTP a 35.03 ± 13.51 únicamente en el ACH60 ($p<0.000$).

Por el contrario, el sistema RTQ incrementó (Cuadro 1, Figura 4c) el porcentaje de los mesoporos en el ACH60 (11.84 ± 4.96) y redujo este porcentaje en el ACH12 (5.94 ± 2.72 ; $p<0.007$) respecto al BTP (9.85 ± 4.59).

Finalmente, el sistema RTQ incrementó (Cuadro 1, Figura 4d) la microporosidad en los ACH5 y ACH60 meses de manera significativa (10.88 ± 4.69 y 10.50 ± 5.64 ; $p < 0.000$, respectivamente) comparados con el BTP (5.88 ± 4.27).

El análisis micromorfológico del BTP revela poros verticales y horizontales tipo fisura además de macroporos de transmisión y numerosas raíces vegetales (Figura 6). En los ACH12 y ACH60 el número de fisuras es menor y la agregación mayor. En el ACH5 se observan una gran cantidad de residuos carbonizados producto de la combustión de la materia orgánica (Figuras 7, 8 y 9).

La densidad aparente (D_{ap}). El sistema RTQ ocasionó incrementos significativos en esta propiedad únicamente en el ACH60 (Cuadro 1, Figura 4g y 4h), con respecto al BTP ($0.83 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$; $0.58 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ respectivamente; $p < 0.025$), en los otros acahuals no se registraron diferencias significativas.

El porcentaje agregados. El sistema RTQ ocasionó una disminución significativa de los microagregados en el ACH60 con respecto al BTP (7.25% y 12.81%; $p < 0.0154$). Por el contrario, el sistema RTQ provocó un incremento significativo en el porcentaje de los macroagregados del acahual de ACH60 (84.41% y 74.04% respectivamente $p < 0.032$) respecto al BTP (Figura 10).

Cobertura de hojarasca. El sistema RTQ disminuyó significativamente el espesor de hojarasca, en todos los acahuals de diferentes edades, respecto al BTP (6.49 cm), (Cuadro 2, Figura 4k).

Efectos del sistema RTQ sobre las propiedades químicas del suelo

El sistema RTQ no afectó significativamente los valores de pH del BTP (6.31; $p > 0.11$). De acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2008) el pH en todos los sitios varió de moderadamente ácido a neutro (Cuadro 2, Figura 5b).

Materia orgánica. El sistema RTQ ocasionó una disminución significativa en el %M.O. en el suelo de los ACH5 (1.34%; $p < 0.0006$) y ACH12 (1.81; $p < 0.002$) respecto al BTP (3.54%). La NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2008), considera como alto el porcentaje del BTP y como medios los porcentajes registrados en los acahuals (Cuadro 2, Figura 5a).

Sodio. El sistema RTQ provocó disminuciones significativas en las concentraciones de sodio en todos los acahuales con respecto al BTP ($P < 0.0239$). La norma no cataloga esta propiedad del suelo (Cuadro 2, Figura 5e).

Potasio. El sistema RTQ incrementó significativamente las concentraciones de potasio en todos los acahuales con respecto al BTP ($0.14 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$; $p < 0.002$). La NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2008) establece como muy baja la concentración de potasio en el BTP y como media la concentración de este elemento en todos los acahuales (Cuadro 2, Figura 5f).

Calcio. El BTP registró una concentración de $14.04 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ y no mostro diferencias significativas con todos los acahuales ($p > 0.09$). De acuerdo con la norma (SEMARNAT, 2008), las concentraciones de calcio son catalogadas como muy altas en todos los sitios (Cuadro 2, Figura 5g).

Magnesio. La concentración de magnesio únicamente disminuyó significativamente en los acahuales de cinco meses ($3.02 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$; $p < 0.009$) y doce meses ($2.18 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$; $p < 0.001$) respecto al BTP ($4.81 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$), en el ACH60 los valores son similares. La NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2008) cataloga como alta la concentración de magnesio en el BTP y los acahuales ACH5 y ACH60; y de concentración media en el ACH12 (Cuadro 2, Figura 5h).

Nitrógeno. El sistema RTQ no alteró el porcentaje de nitrógeno. La NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2008) cataloga los porcentajes de nitrógeno total del BTP y del ACH60 meses como muy alto y como alto en el ACH5 y ACH12 (Cuadro 2, Figura 5c).

Fósforo disponible. La concentración de fósforo disponible en el BTP fue de $56.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y no registro diferencias significativas con los acahuales ($p > 0.14$). La NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2008) establece como alta la concentración de fósforo disponible en todos los sitios de estudio (Cuadro 2, Figura 5d).

Cuadro 1. Efecto del sistema RTQ sobre las propiedades hídricas y físicas del suelo de un bosque tropical perennifolio (BTP) y acahuales de diferentes edades en la selva Lacandona, Chiapas.

ZONA	Porosidad total %	Distribución de poros			R ₁ cm·min ⁻¹	R ₂	K _{fs} cm·seg ⁻¹	Φ _m cm ² ·seg ⁻¹	Contenido de humedad %	Humedad relativa	D _{ap} g·cm ⁻³
		macroporos	mesoporos %	microporos							
BTP	69.07±7.65 ^a	56.38±10.97 ^a	9.85±4.59 ^a	5.88±4.27 ^a	13.62±14.45 ^a	30±21.54 ^a	0.038±0.027 ^a	0.29±0.34 ^a	37.08±6.13 ^a	73.75±17.67 ^a	0.58±0.11 ^a
ACH5	64.53±11.78 ^a	46.57±15.99 ^a	7.06±4.01 ^a	10.88±4.96 ^b	30±13.41 ^b	62.4±15.64 ^b	0.055±0.032 ^a	0.32±0.30 ^a	34.23±2.58 ^a	75±12.90 ^a	0.70±0.02 ^a
ACH12	56.78±8.41 ^b	45.48±9.97 ^a	5.94±2.72 ^b	5.36±3.56 ^a	11.28±8.20 ^a	30±15.87 ^a	0.036±0.029 ^a	0.30 ^a	32.11 ^a	80±23.09 ^a	0.83 ^a
ACH60	57.38±11.36 ^b	35.03±13.51 ^b	11.84±4.96 ^a	10.50±5.64 ^b	55.2±13.68 ^b	72±8.48 ^b	0.030±0.025 ^a	0.85±0.47 ^b	35.90±1.43 ^a	75±17.32 ^a	0.83±0.03 ^b

BTP=bosque tropical perennifolio; ACH5= acahual de 5 meses; ACH12=acahual 12 meses; ACH60= acahual 60 meses. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas a un nivel de 0.05. R₁ y R₂: tasas de infiltración a 5 cm y superficial, respectivamente; K_{fs}= conductividad hidráulica saturada en campo; Φ_m= potencial de flujo mátrico, D_{ap}= densidad aparente. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas a un nivel de 0.05.

Cuadro 2. Efecto del sistema RTQ sobre las propiedades químicas del suelo de un bosque tropical perennifolio (BTP) y acahuales de diferentes edades en la selva Lacandona, Chiapas.

Zona	pH	M.O.S.	N _{total}	P _{disp.}	Na	K	Ca	Mg	Cobertura de hojarasca	Temperatura
									(%)	(mg·kg ⁻¹)
BTP	6.3±0.56 ^a	3.54±1.24 ^a	0.26±0.13 ^a	56.09±17.79 ^a	0.2 ^a ±0.05 ^a	0.14±0.04 ^a	14.04±0.95 ^a	4.81±1.41 ^a	6.49±2.50 ^a	16
ACH5	6.97±0.44 ^a	1.34±0.31 ^b	0.21±0.02 ^a	73.95±24.77 ^a	0.15±0.03 ^b	0.36±0.05 ^b	14.96±0.01 ^a	3.02±0.64 ^b	0 ^b	23
ACH12	6.46±0.03 ^a	1.81±0.17 ^b	0.21±0.04 ^a	49.55±3.43 ^a	0.16±0.01 ^b	0.46±0.09 ^b	14.66±0.06 ^a	2.18±0.57 ^b	3.14±1.05 ^b	18
ACH60	6.92±0.18 ^a	4.06± 1.72 ^a	0.28±0.07 ^a	72.06±2.78 ^a	0.15±0.02 ^b	0.44±0.1 ^b	14.90±0.12 ^a	4.79±0.93 ^a	4.48±1.18 ^b	16

BTP=bosque tropical perennifolio; ACH5= acahual de 5 meses; ACH12=acahual 12 meses; ACH60= acahual 60 meses. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas a un nivel de 0.05.

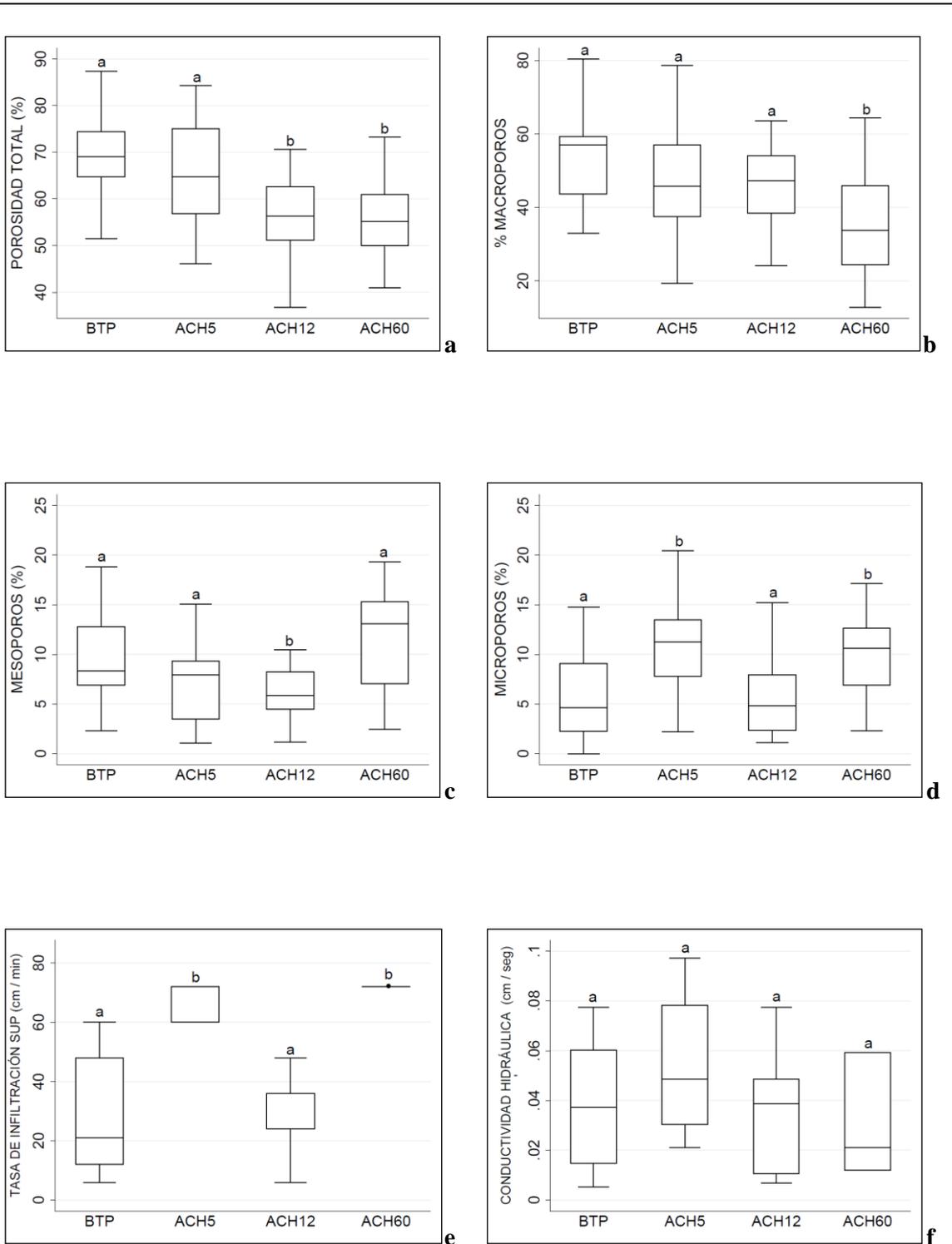


Figura 4. Efectos del sistema RTQ sobre las propiedades hídricas del suelo del bosque tropical perennifolio en la región Lacandona, Chiapas. BTP= bosque tropical perennifolio; ACH5= acahual de 5; ACH12= acahual 12 y ACH60= acahual 60 meses. Letras diferentes indican diferencias significativas.

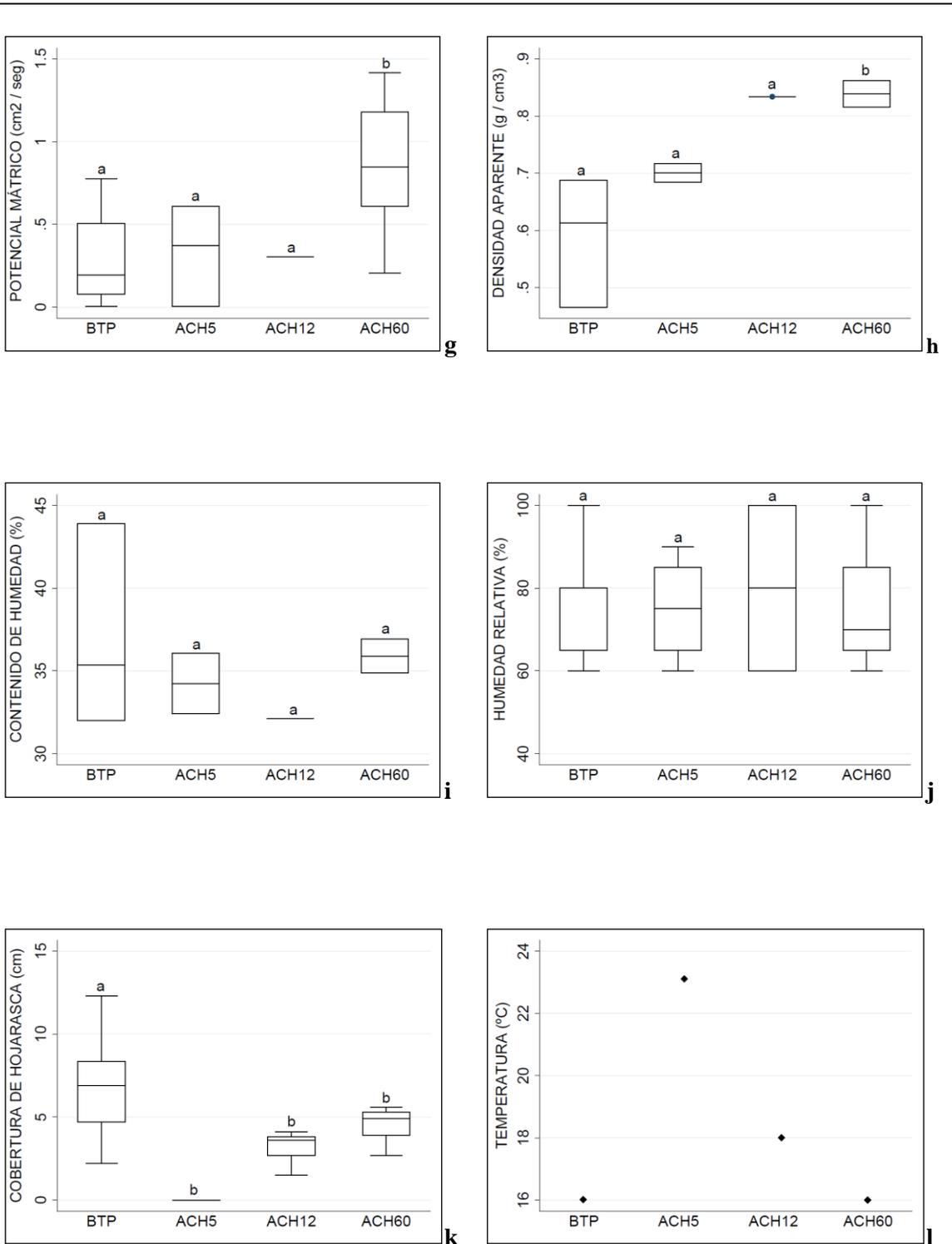


Figura 4 (continuación). Efectos del sistema RTQ sobre las propiedades hídricas y físicas del suelo del bosque tropical perennifolio en la región Lacandona, Chiapas. A) BTP: bosque tropical perennifolio; B) ACH5= acahual de 5, ACH12=acahual 12 y ACH60= acahual 60 meses. Letras diferentes indican diferencias significativas.

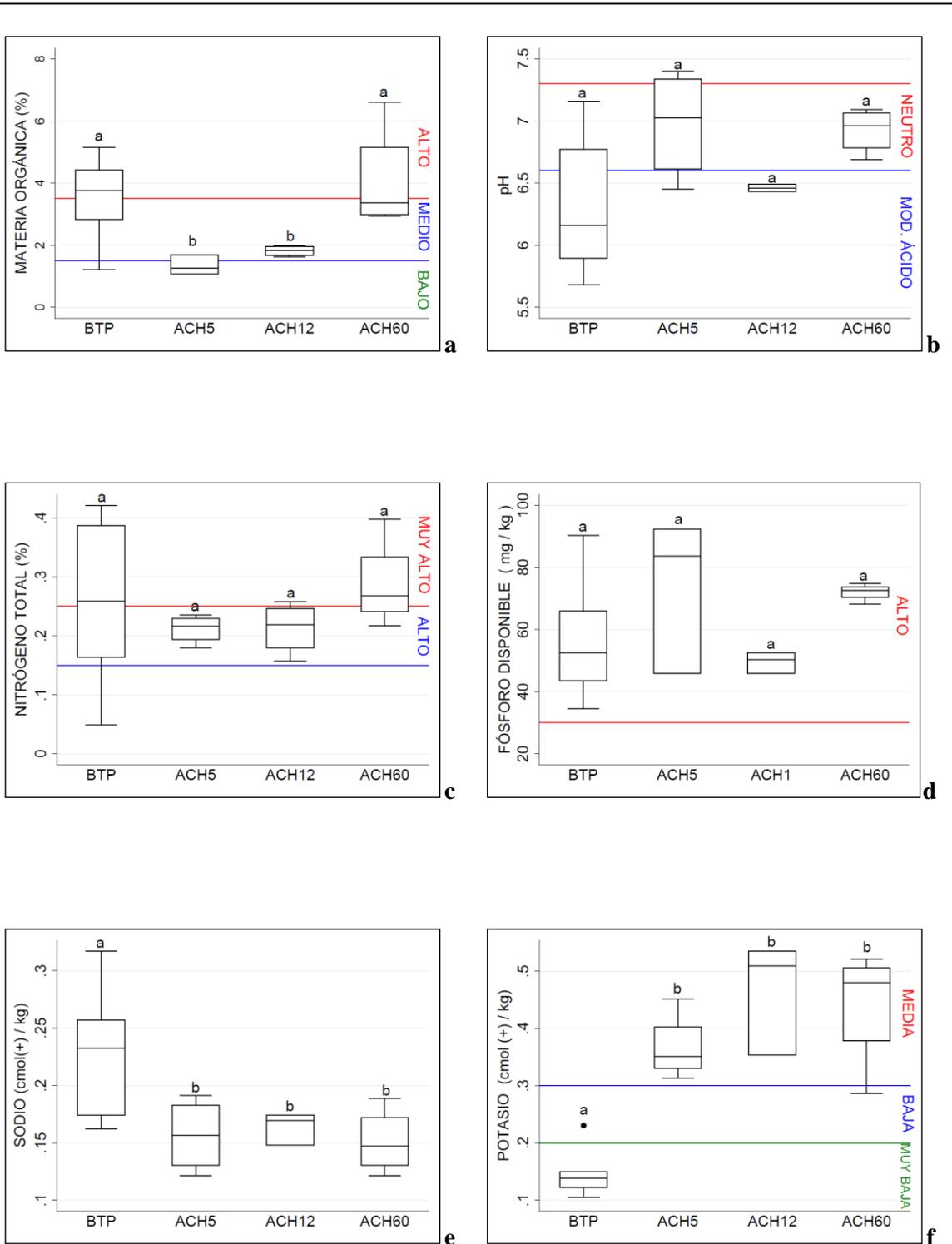


Figura 5. Efectos del sistema RTQ sobre las propiedades químicas del suelo del BTP en la región Lacandona, Chiapas. A) BTP= bosque tropical perennifolio; B) ACH5= achual de 5; C) ACH12= achual 12 y ACH60= achual 60 meses. letras diferentes indican diferencias significativas.

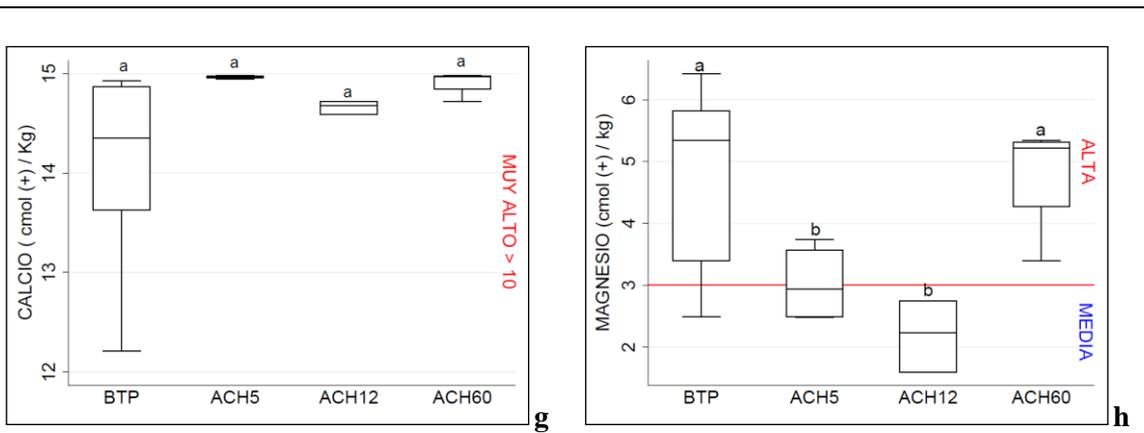


Figura 5 (continuación). Efectos del sistema RTQ sobre las propiedades químicas del suelo del BTP en la región Lacandona, Chiapas. A) BTP= bosque tropical perennifolio; B) ACH5= acahual de 5; C) ACH12= acahual 12 y ACH60= acahual 60 meses. letras diferentes indican diferencias significativas.

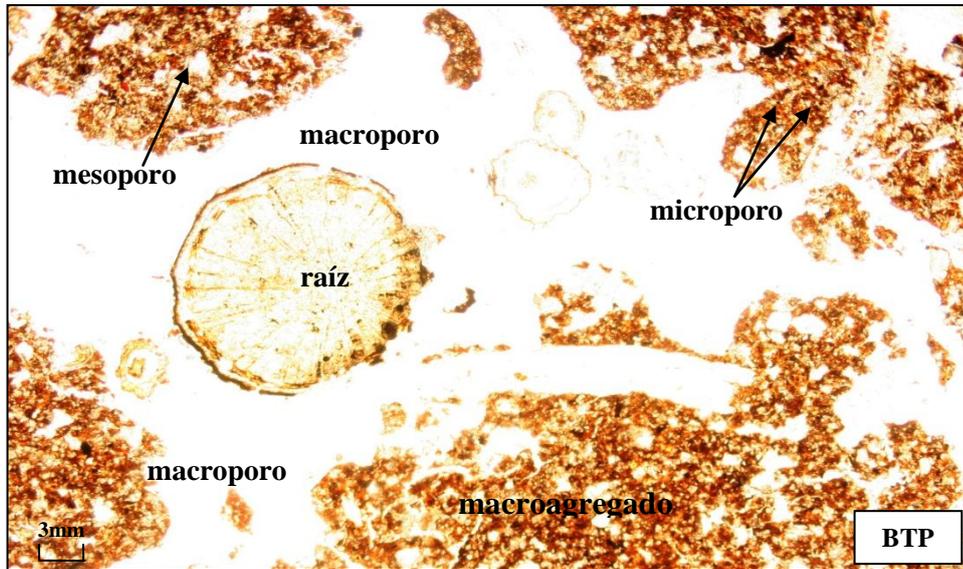


Figura 6. Microfotografía del BTP. Corte de raíz (Rz) contigua a macro (Mic) y microagregados (Mic) que contienen una gran cantidad de microporos (mPr) y porosidad (Pr) interconectada vertical y horizontalmente.

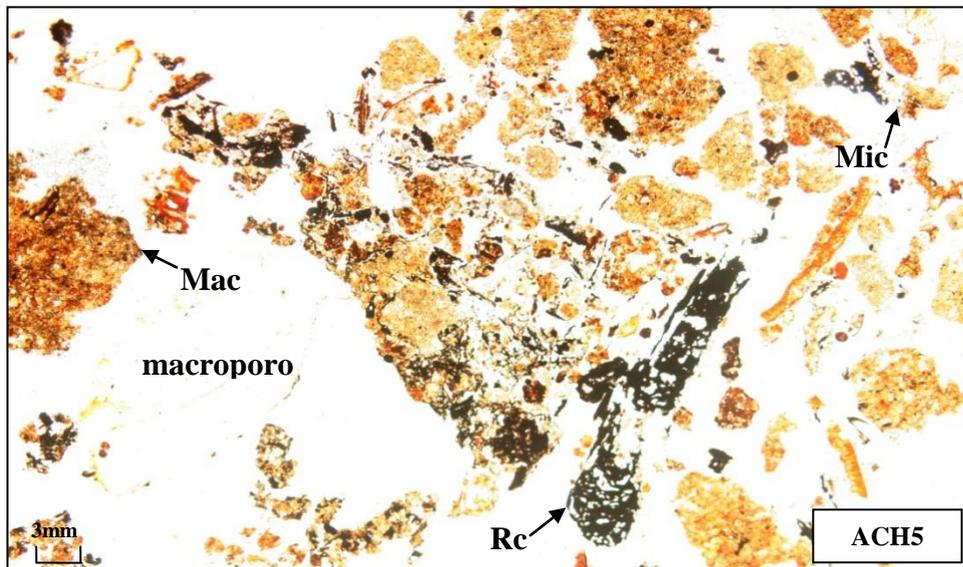


Figura 7. Microfotografía del ACH5 meses. Macroagregados (Mac), Microagregados (Mic) y residuos carbonizados (Rc) producto de la quema.

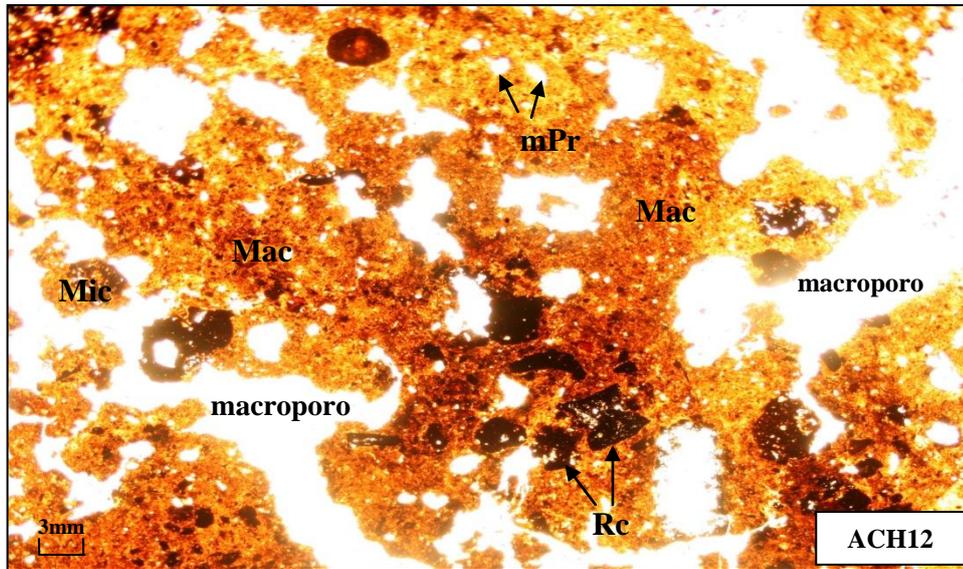


Figura 8. Microfotografía del ACH12 meses con predominancia de macroagregados (Mac) conteniendo microporos (mPr); se aprecia una interconexión entre poros (Pr) de tipo horizontal y residuos carbonizados (Rc).

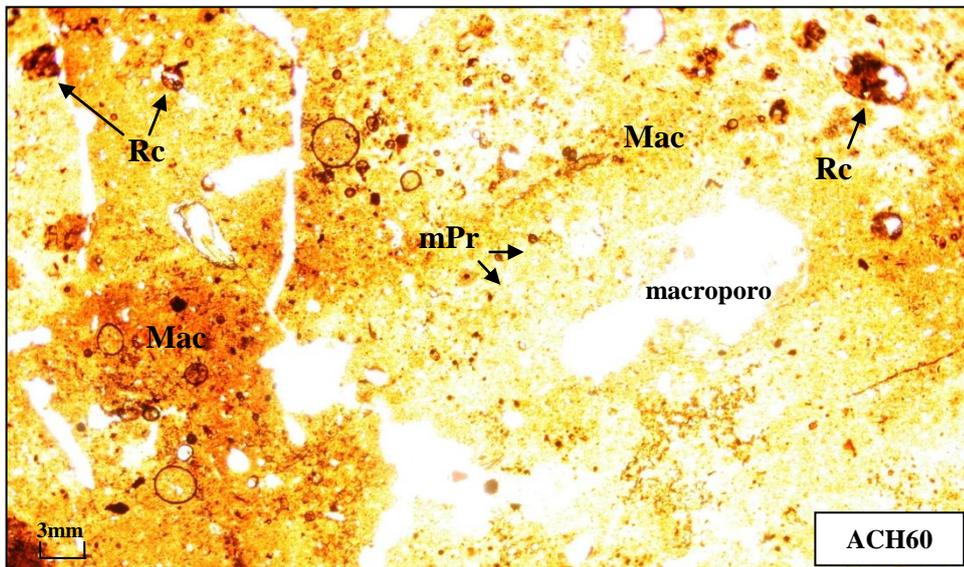


Figura 9. Microfotografía del ACH60 meses. Residuos carbonizados (Rc), Macroagregados (Mac), microporos (mPr).

DISCUSIÓN

Efectos del sistema RTQ sobre las propiedades hídricas

Los valores registrados para la conductividad hidráulica (k_{fs}) y la tasa de infiltración superficial (R_2) en el BTP y acahuales de la región Lacandona son altos a nivel mundial, ya que son mayores respecto a los obtenidos por Mendoza-Vega y Messing (2005), Céledon-Muñiz (2006), Zimmerman *et al.*, (2006), Are *et al.*, (2009) y Toriyama *et al.*, (2013) y menores al registrado por Ziegler *et al.*, (2006) en otros BTP del mundo, por lo que el sistema RTQ no afecta estas propiedades hídricas. La presencia de agregados carbonizados en el BTP indica que estos suelos han sido afectados por quemaduras anteriores.

Los altos valores de K_{fs} y R_2 son producto de la elevada porosidad total (mayor del 56%) registrada en este sitio y en los acahuales de diferentes edades, a pesar de que se registraron diferencias significativas en la porosidad total. Es importante señalar que los macroporos del suelo (56.38%) interconectados vertical y horizontalmente, desempeñan un papel fundamental en los elevados registros de K_{fs} y R_2 .

La disminución de la macroporosidad en ACH60, se ve compensada con el incremento de mesoporos y microporos que contribuyen a la retención y disponibilidad de agua. La disminución de macroporos puede explicarse a que durante la quema el incremento de T° ocasiono que algunos componentes del suelo se deshidrataran provocando una fusión de agregados y el colapso de la estructura macroporosa del suelo. La fusión de agregados es posible debido a la acción cementante del Fe^{2+} . La presencia de Fe^{2+} es común en rocas calizas (Bigham *et al.*, 2002).

La disminución de los macroporos se relaciona con la formación de macroagregados en el suelo como se observa en los ACH5, ACH12 y ACH60 meses. La generación de los macroagregados se atribuye principalmente a la unión de varios microagregados con la materia orgánica y las arcillas del suelo en función de la unión de los complejos humus-arcilla y a las altas concentraciones de carbonatos de Ca^{2+} en los suelos de la región Lacandona (Bronick y Lal, 2005).

Por otra parte, la disminución significativa de los macroporos y el incremento de la micro y mesoporosidad en el ACH60 favoreció una mayor retención de agua lo cual se relaciona con el incremento significativo del Φ_m en este sitio ($0.85 \pm 0.47 \text{ cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1}$)

respecto al BTP de la región Lacandona ($0.29 \pm 0.34 \text{ cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1}$). La retención de agua por los microporos ocurrió a través de los fenómenos de capilaridad en el suelo.

En esta investigación se observó una tendencia entre el incremento en el porcentaje de los macroagregados con la disminución relativa en la porosidad total respecto al tiempo de barbecho de los acahuales (Figura 10).

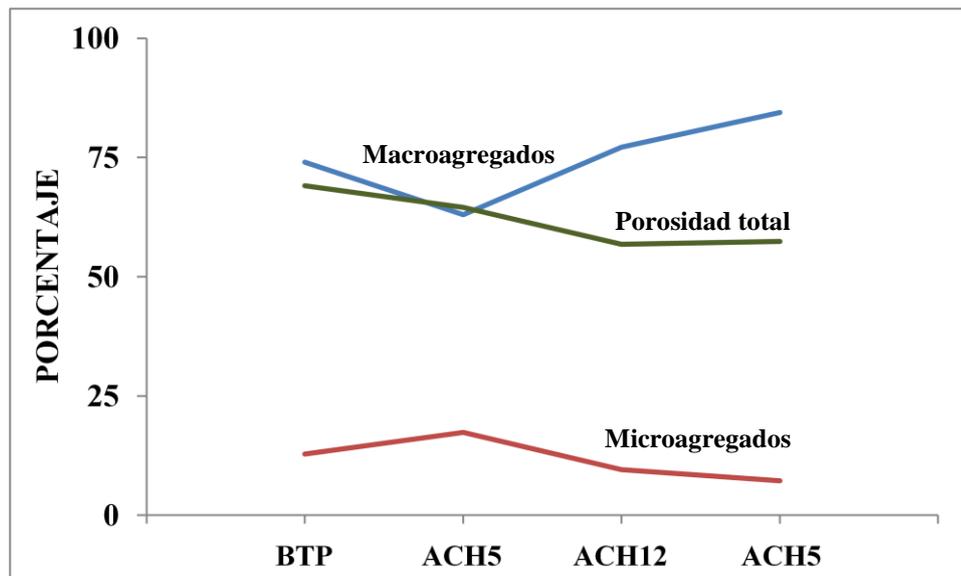


Figura 10. Relación entre los macroagregados y microagregados con la porosidad total del suelo en el BTP y acahuales de diferentes edades.

Bajo el sistema RTQ la T° del suelo entre el BTP y el ACH5 aumenta de 16°C a 23°C respectivamente. Conforme crece la vegetación con el desarrollo de los acahuales, disminuye la incidencia solar en el suelo y su T° vuelve a sus valores originales. Los incrementos de temperatura en el suelo no afectaron el contenido de humedad y la humedad relativa ya que no se registraron disminuciones significativas respecto al BTP de la región Lacandona.

Las temperaturas del suelo en la región Lacandona son menores que en otras zonas tropicales. Al respecto Ramírez y Moreno (2008) en un BTP de Colombia registro de 22 a 27°C alcanzando los máximos en el verano.

Efectos del sistema RTQ sobre las propiedades químicas

El sistema RTQ disminuyó las concentraciones de sodio y magnesio. La disminución de las concentraciones se atribuye a su solubilidad. A pesar de la disminución de Mg, sus valores indican un nivel alto de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2002.

En las demás propiedades como N, P, Ca, y pH no se detectaron diferencias significativas, entre BTP y acahuales, como se ha encontrado en otras selvas (Chávez, 2011), así como en otros ecosistemas (Franco-Vizcaíno y Sosa-Ramírez 1997), aun cuando otros autores encuentran incrementos de P en incendios ligeros pero disminuyen en incendios de mayor intensidad, debido a que a mayores T° hay mayor fijación en Indonesia (Ketterings *et al.* 2002).

En general y con base en los resultados obtenidos podemos decir que para las condiciones ambientales de la región Lacandona, las propiedades de sus suelos y el sistema RTQ practicado en la región no afecta. Lo mismo se encuentra en la región de la Chinantla Oaxaqueña Chávez (2011) y apoyan lo señalado por Hernández-Xolocotzi, (1985); Gómez-Pompa, (1985); Juo y Manu, (1996); Alegre y Cassel, (1996) y Are *et al.*, (2009) el sentido de que el sistema RTQ es una práctica agrícola adecuada porque no afecta las propiedades del suelo y su sustentabilidad depende de las densidades poblacionales bajas, de los ciclos de barbecho largos y de los suelos con altas concentraciones de calcio (Chávez, 2011).

La LGEEPA establece en su artículo 101 la necesidad de cambiar progresivamente esta práctica agrícola "...a otras que no impliquen el deterioro de los ecosistemas". En el Informe de la Situación del Medio Ambiente (2008), la SEMARNAT mantiene una postura escéptica frente a este tema.

Nuestros resultados muestran que el sistema RTQ no afecta las propiedades hídricas ni el servicio ambiental hidrológico. Los análisis micromorfológicos de esta investigación, sustentan la gran recarga de agua y los elevados valores de infiltración y de Kfs que ocurren en el suelo de un BTP en la principal región hidrológica de México, la cual posee la categoría de tercera a nivel continental y séptima a nivel mundial.

Finalmente nuestros resultados son para suelos derivados de roca caliza ya que la presencia del catión calcio y su elevada energía de hidratación favorece la precipitación y retención de sedimentos, sin embargo para otros tipos de suelo deben realizarse estudios similares y contrastar los resultados para tener mayores fundamentos sobre la autorización o prohibición del sistema RTQ.

CONCLUSIONES

1. El sistema RTQ incrementa los valores de infiltración superficial y conductividad hidráulica, los cuales son altos a nivel mundial.
2. Las altas concentraciones de Ca^{+2} favorece la macroporosidad del suelo y tiene un papel fundamental en los elevados valores de recarga de agua dentro del BTP y en los acahuales de diferentes edades.
3. El sistema RTQ provoca variaciones en los porcentajes de macroporos a mesoporos y microporos y permite mantener una alta capacidad de conducir agua y retenerla.
4. Las elevadas concentraciones de Ca^{+2} y Fe^{+2} favorecen la formación de agregados en el desarrollo de acahuales.
5. El sistema RTQ no afecta la disponibilidad del porcentaje de nitrógeno y la concentración de fósforo disponible, ni el pH e incrementa la concentración de potasio.
6. Con base en lo anterior el sistema RTQ practicado por los mayas lacandones es una forma económica y sencilla de acelerar del proceso de ciclaje de los nutrimentos del bosque tropical perennifolio sin afectar el servicio ambiental hidrológico.

LITERATURA CITADA

- Alegre, J.C. y Cassel, D.K. (1996). Dynamics of soil physical properties under alternatives systems to slash-and-burn. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 58: 39-48.
- Angulo, R., Vandervaere, J., Roulier, S., Thony, J., Gaudet, J., Vauclin, M. (2000). Field measurement of soil surface properties by disc and ring infiltrometers. A review and recent development. *Soil and Tillage Research*. 55: 1-29.
- Are, K., Oluwuatosin, G., Adeyolanu, O., Oke, A. (2009). Slash and burn effect on soil quality an alfisol: Soil physical properties. *Soil and Tillage Research*. 103: 4-10.
- Archibald, S., Staver, C.A. y Levin, S.A. (2012). Evolution of human-driven fire regimes in Africa. *PNAS*. Vol.109. No.3. 847-852.
- Arriaga, L. V. Aguilar, J. Alcocer (2002). [en línea]. Listado de las Regiones Terrestres Prioritarias. En: Región Terrestre Prioritaria Lacandona. Aguas Continentales y Diversidad Biológica de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. [Fecha de Consulta: 20 Mayo 2012]. Disponible en: <<http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/hidrologicas.html>>.
- Bigham, J., Fitzpatrick R. y Schulze,D. (2002). Soil Mineralogy with Environmental Applications. Soil Science Society of America. USA. 387 pp.
- Bond, W. y Keeley, J. (2005). Fire as a global “herbivore”: the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*. Vol. 20. No.7. 387-394.
- Bowman D., Balch, J., Artaxo, P., Bond, W., Carlson, J., Cochrane, M., D’Antonio, C., DeFries, R., Doyle, J., Harrison, S., Johnston, F., Keeley, J., Krawchuk, M., Kull, C., Marston, B., Moritz, M., Prentice, I., Roos, C., Scott, A., Swetnam,T., Van Der Werf, G., Pyne, J. Fire in the earth system. *Science*. Vol. 324. 481-484.
- Bronick, C. J. y Lal, R. (2005). Soil structure and management: A review. *Geoderma*. 124: 3-22.
- Brown, K.S., Marean, C., Herries, A., Jacobs, Z., Tribolo, C., Braun, D., Roberts, D., Meyer, M., Bernatchez,J. (2009). Fire as an Engineering Tool of Early Modern Humans. *Science*. Vol. 325. 859-862.

- Burger, J y Kelting, D. (1998). Soil quality monitoring for assessing sustainable forest management. *Soil Science Society of America*. Special publication. 53:17-52.
- Carter, M.D. y Gregorich, E.G. (2008). Soil sampling and methods of analysis. 2ª ed. CSSC. Canada. 1224p.
- Castro Mora *et al.* (1999). Monografía Geológico-Minera del Estado de Chiapas. Consejo de Recursos Minerales. *SECOFI*. 89 pp.
- Chávez Barrera, J.S. (2011). Efectos del sistema roza, tumba y quema sobre el servicio ambiental hidrológico de un bosque tropical perennifolio de la cuenca del Papaloapan, Oaxaca. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. 44 pp.
- Celedón Muñiz, H. (2006). Impacto del sistema roza, tumba y quema sobre las características de tres unidades de suelo en la Selva Lacandona de Chiapas. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 120 pp.
- Cochrane, J. (2003). Fire science for rainforest. *Nature*. Núm. 421. 914-919.
- CONABIO (2012). [en línea]. Biodiversidad Mexicana: Selvas Húmedas (Selva Alta Perennifolia) En: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. [Fecha de Consulta: 20 Diciembre 2012]. Disponible en: <http://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/selvaHumeda.html>
- CONAGUA (2012). [en línea]. Atlas Digital del Agua en México 2012. En: Sistema Nacional de información del Agua. Comisión Nacional del Agua. [Fecha de Consulta: 18 Enero 2013]. Disponible en: <<http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=60&n3=60>>
- Crutzen, P.J. y Andreae, M.O. (1990). Biomass Burning in the Tropics: Impact on Atmospheric Chemistry and Biogeochemical Cycles. *Science*. 34:110-114.
- De Bano, L.F., Neary D., y Ffolliot, P. (1998). Fire's effects on ecosystems. New York: John Wiley and sons. Inc. 333 pp.
- Deng, F., Zang, R., Chen., B. (2008). Identification of functional groups in an old-growth tropical montane rainforest on Hainan Island, China. *Forest Ecology and Management*. 255: 1820-1830.

- Eastmond, A., y Faust, B. (2006). Farmers, fires, and forest: a green alternative to shifting cultivation for conservation of the Maya forest?. *Landscape and Urban Planning*. 74: 267-284.
- Franco V, E. y Sosa R., J. (1997). Soil properties and nutrients relations in burned and unburned Mediterranean-climate shrublands of Baja California, Mexico. *Acta Oecologica*. 18 (4), 503-517.
- Fitzpatrick, E.A. (1990). Micromorfología de suelos. CECSA. México. 476 pp.
- García, E. (1998). Climas (Clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México.
- Geissert, D. Gómez-Tagle, A., Gómez-Tagle, A. y Guevara, M. (2012). Funciones ecohidrológicas del suelo y su importancia para la conservación y el desarrollo. Comisión para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO). *Biodiversitas*. 105:10-12.
- Giertz, S., Junge, B. y Diekkrüger, B. (2005). Assessing the effects of land use change on soil physical properties and hydrological processes in the sub-humid tropical environment of West Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*. 30: 485-496.
- Gómez Pompa, A. (1987). On maya silviculture. University of California Press. Vol. 3. No. 1. 1-17
- Gómez Pompa, A. (1985). Los Recursos bióticos de México (Reflexiones). Alhambra Mexicana. Veracruz. 122 pp.
- Gómez Tagle Chávez, A. (2008). Variabilidad de las propiedades edáficas relacionadas con la infiltración y la conductividad hidráulica superficial en la cuenca del Cuitzeo. Tesis de Doctorado. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 162 pp.
- Hernández Xolocotzi, E. (1985). Xolocotzia. *Revista de Geografía Agrícola*. México. Tomo I. 425 pp.
- Horn, T., Taubner, H., Wuttke, M., Baumgarlt, T. (1994). Soil physical properties related to soil structure. *Soil and Tillage Research*. 30:187-216.

- INEGI (2005). [en línea]: México en cifras: Información nacional, por entidad federativa y municipios. En: Instituto Nacional de Geografía y Estadística, INEGI. Uso de Suelo y Vegetación. [Fecha de Consulta: 20 Mayo 2012]. Disponible en: <<http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx>>.
- INEGI (2012). [en línea]: Chiapas. En: Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México. [Fecha de consulta: 24 Mayo 2012] Disponible en: <<http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM07chiapas/mediofisico.html>>.
- INEGI (2012). [en línea]: Principales suelos de México. [Fecha de consulta: 24 Mayo 2012] Disponible en: <<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/fisigeo/principa.cfm>>.
- INEGI (2000). [en línea]: Mapa edafológico. En: Atlas cibernético Selva Lacandona. (Centro de Investigación en Geografía y Geomática “Ing. Jorge L. Tamayo”, A.C.). [Fecha de consulta: 14 Octubre 2012] Disponible en: <<http://mapas.centrogeo.org.mx/Website/Lacandona/LacEdafo/viewer.htm>>.
- Joseph, D. y Michelle, M. (2007). [en línea]: Slash and burn. En: Encyclopedia of Earth. Eds. Cutler J. Cleveland (Washington, D.C.: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment). [Fecha de consulta: 20 Mayo 2012] Disponible en: <http://www.eoearth.org/article/Slash_and_burn>.
- Juo, A. y Manu, A. (1996). Chemical dynamics in slash-and-burn agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 58:49-60.
- Juárez, S. y Cano, Z. El cuarto elemento y los seres vivos: Ecología del fuego. *Ciencias*. Num. 87. 4-12.
- Ketterings, Q., Noordwijk, M., y Bigham, J. (2002). Soil phosphorus availability after slash and burn fires of different intensities in rubber agroforest in Sumatra, Indonesia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 92: 37-48.
- Kutílek, M. y Nielsen, D.R. (2007). Interdisciplinary of Hydropedology. *Geoderma*. 138: 252-260.
- Lowell, D. (1990). Soil micromorphology: a basic and applied science. Elsevier. The Netherlands. 716 pp.

- McGovern, H.J., Deeks, L., Hallett, P., Ritz, K., Young, I. (2001). A sterile environment for growing, and monitoring, micro-organisms under a range of soil matric potentials. *Soil Biology & Biochemistry*. 33: 689-691.
- Marques Dos Santos, M.J. (2004). Probabilidad y Estadística para ciencias Químico-Biológicas. FES Zaragoza, UNAM. México. 626 pp.
- 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.
- Mendoza Vega, J., y Messing, I. (2005). The influence of land and fallow period on the properties of two calcareous soils in the humid tropics of southern Mexico. *CATENA*. 60: 279-292.
- Moya-García, X., Caamal, A., KuKu, B., Chan Xool, E., Armendáriz, I., Flores, J., Moguel, J., Noh Poot, M., Rosales, M., Xool, J. (2003). La agricultura campesina de los mayas en Yucatán. LEISA Revista de Agroecología. Ed. Especial.
- Muñoz, D., Mendoza, C., López, F., Soler, A., Hernández, M. (2000). Edafología: Manual de Métodos de Análisis de Suelo. FES Iztacala, UNAM. 82 pp.
- Neary, D., Kevin, C., & De Bano, L. (2005). Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water. *Gen. Tech Rep.* Vol. 4. USDA. 250 pp.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2009). Guía para la descripción de suelos. 4ª ed. Roma. 111 pp.
- Pennington, T., Sarukhán, J. (2005). Árboles Tropicales de México. Manual para la identificación de especies. UNAM-FCE. 523 pp.
- Pyne, S. J. (2010). The ecology of fire. *Nature Education Knowledge*. 3 (10):30.
- Pyne, S. J. (2001). Fire: a brief history. University of Washington Press. Canada. 207pp.
- Randall, S. (2005). Soil genesis and geomorphology. Cambridge University Press. USA. 817 pp.
- Real Academia Española de la Lengua. (2012). [en línea]: incendio y quema En: Diccionario de la Lengua Española. [Fecha de consulta: 13 Enero 2012] Disponible en: <<http://www.rae.es/rae.html>>.

- Reyes, P. (2010). Bioestadística aplicada a la agronomía, biología y química. 2ª ed. Trillas. México. 216 pp.
- Reynolds, W. y Elrick, D. (1986). A method for simultaneous in-situ measurement in the vadose zone for fiel-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship. *Ground Water Monitoring Review*. 6: 84-95.
- Robert, M. (2002). Captura de Carbono en los suelos para un mejor manejo de la Tierra. FAO. Roma. 63 pp.
- Ruy, S., y Cabidoche, M. (1998) Hydraulic conductivity of the matric porosity of an unsaturated vertisol: a field and laboratory comparison. *European Journal of Soil Science*. 49: 175-185.
- SEMARNAT (2003a). Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales 2002. México. 275 pp.
- SEMARNAT (2007). Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios de disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas que forman parte de la porción de la región hidrológica denominada Grijalva-Usumacinta.
- SEMARNAT (2002). Norma Oficial Mexicana (NOM-021-SEMARNAT-2000) que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.
- SEMARNAT (2009). Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales 2008. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 358 pp.
- SEMARNAT (2011). Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales.
- Schoenholtz, S., Van Miegroet, H., Burger, J. (2000). A review of chemical and physical properties as indicators of forest soils quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*. 138: 335-356.
- Shoeneberger, P., Wysocki, D., Benham, E., Brodenson, W. (2002). Field book for describing and sampling soils. National Soil Survey Center.USA.

- Summer, M. (2000). Handbook of soil science. CRC Press. USA. 354 pp.
- Thomas, S., y Baltzer, J. (2002). [en línea]: Tropical Forest. En: ELS. Citable reviews in the life science. [Fecha de consulta: 21 Mayo 2012]. Disponible en :<
<http://www.els.net/WileyCDA/>>.
- Toriyama, J., Ohnuki, Y., Ohta, S., Kosugi, K., Kabeya, N., Nobuhiro, T., Shimizu, A., Tamai, K., Araki, M., Keth, S., Chann, S.(2013). Soil physicochemical properties and moisture dynamics of a large soil profile in a tropical monsoon forest. *Geoderma*. 197-198: 205-211.
- United States Department of Agriculture. (2012). [en línea]: Saturated hydraulic conductivity: water movement concepts and class history. En: Natural Resource Conservation Service. [Fecha de consulta: 20 Mayo 2012] Disponible en: <
<http://soils.usda.gov/technical/technotes/note6.html>>.
- Ventrella, D., Losavio, N., Vonella, A., Leij,F. (2005).Estimating hydraulic conductivity of a fine-textured soil using tension infiltrometry. *Geoderma*. 124:267-277.
- Zamudio Guevara, M. (2011). Repoblación y captura de carbono en acahuales y un bosque tropical de la región Lacandona Chiapas. México. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México. 62 pp.
- Zar, J. (1999). Bioestadistical Analysis. Prentice Hall. Cuarta ed. USA.
- Ziegler, A., Negishi, J., Sidle, R., Noguchi, S., Rahim, N. (2006). Impacts of logging disturbance on hillslope saturated hydraulic conductivity in a tropical forest in Penninsular Malaysia. *CATENA*. 67: 89-104.
- Zimmerman, B., Elsenbeer, H., y De Moraes, J. (2006). The influence of land-use on soil hydraulic properties, implications for runoff generation. *Forest Ecology and Management*. 222: 29-38.
- Zhou, X., Lin, H., White, E. (2007). Surface soil hydraulic properties in four soil series under different land uses and their temporal changes. *CATENA*. 73: 180-188.