



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

**EFFECTOS DEL SISTEMA ROZA, TUMBA Y QUEMA SOBRE  
EL SERVICIO AMBIENTAL HIDROLÓGICO DE UN BOSQUE  
TROPICAL PERENNIFOLIO DE LA CUENCA DEL  
PAPALOAPAN, OAXACA**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**BIÓLOGA**

PRESENTA:

**JANELLE SACNITÉ CHÁVEZ BARRERA**

DIRECTOR DE TESIS:

DR. EFRAÍN R. ÁNGELES CERVANTES

PROYECTO FINANCIADO POR PAPIIT-IN-217308



MÉXICO, D.F.

ABRIL 2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

*De nada sirve el conocimiento si solo es para intelectualizar...*

## AGRADECIMIENTOS

Al Universo por permitirme estar aquí.

A mis padres y hermanos que son parte fundamental en mi crecimiento como ser humano, por la ayuda incondicional durante todo este tiempo de vida, por la paciencia y principalmente por el amor que me tienen.

A la UNAM y a la FES Zaragoza por la maravillosa experiencia que me han brindado y por las facilidades que me han otorgado.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) IN-217308 por la beca de alumno para la realización de la tesis.

Al Dr. Efraín R. Ángeles Cervantes por el gran apoyo, paciencia, enseñanzas desde la mitad de la carrera y en la tesis, por los consejos, correcciones e impulsarme para crecer no solo científicamente sino como persona.

Al Dr. Gerardo Cruz Flores, M. en C. Rico Bernal, M. en C. Ramiro Ríos Gómez y al M. en C. Jorge A. Valdivia Anistro por la paciencia para enseñarme y transmitirme sus conocimientos y especialmente por las correcciones para la mejora del escrito de la tesis.

A la Dra. Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena por sus valiosas aportaciones de Micromorfología de suelos, así como al Laboratorio de Génesis y Clasificación de Suelos del Colegio de Postgraduados por la ayuda con las láminas delgadas.

Al Sr. Severino Alemán Cruz por facilitarme su terreno para este estudio y el transporte durante mi estancia en Cerro Marin.

A mi gran compañero, colega y amigo J. Manuel García Castro por su cariño y por el apoyo incondicional en todo momento.

Al Biol. Enrique Suástegui Méndez por las múltiples asesorías de Edafología y Micromorfología de suelo y por calidad humana que lo caracteriza.

A Mariana Zamudio Guevara por enseñarme a soñar más alto.

A Tania González, Diana Jiménez, Adriana Vallejo, Juan Poblano, Erika Roxana. Nadia Sandoval, y a todos aquellos que me han brindado su amistad.

A mi otra gran familia de Gansolandia por compartir esta filosofía de vida.

## **DEDICATORIA**

*A mis padres Julieta Barrera G. y Ricardo Chávez O. por su fortaleza y amor.*

*A mi hermanito Diego Chávez B. por su ternura y comprensión.*

*A mi magno amigo J. Manuel García C. por ser una experiencia de vida para mí.*

*Al gran Dr. Efraín R. Ángeles Cervantes por su bondad, maestría y maravilloso corazón.*

## ÍNDICE

	Página
Agradecimientos.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Índice de cuadros y figuras.....	vi
Resumen.....	vii
Introducción.....	1
Antecedentes.....	2
Interrogantes y objetivos.....	9
Zona de estudio.....	10
Método.....	12
Resultados.....	18
Discusión de resultados.....	26
Conclusión.....	35
Literatura citada.....	36

## ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

Cuadro	Página
1 Efecto del sistema RTQ sobre las propiedades hídricas del suelo.....	22
2 Efecto del sistema RTQ sobre las propiedades químicas del suelo.....	23

Figura	Página
1 Ubicación de la zona de estudio.....	12
2 Sitios de estudio.....	13
3 Representación gráfica en las que se tomaron las fotomicrografías.....	14
4 Efecto del sistema RTQ sobre las propiedades hídricas del suelo.....	24
5 Efecto del sistema RTQ sobre las propiedades químicas del suelo.....	25
6 Conductividad hidráulica ( $K_{fs}$ ) del suelo en bosque tropical perennifolio en distintos sitios.....	28
7 Fotomicrografías del BTP.....	32
8 Fotomicrografías del ACH4.....	33
9 Fotomicrografías del ACH25.....	34

## RESUMEN

El sistema roza, tumba y quema (RTQ) presenta dos enfoques contradictorios, uno considera que es sustentable y el otro como una práctica que degrada al suelo, por lo tanto es necesario tener mayor evidencia científica para corroborar el efecto del sistema agrícola RTQ sobre el ambiente. El efecto del RTQ sobre el servicio ambiental hidrológico no se ha estudiado. Por lo anterior el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del sistema RTQ sobre las propiedades hídricas del suelo y su relación con las propiedades químicas. El estudio se realizó en ejido Cerro Marin, municipio San Juan Bautista Valle Nacional, Oaxaca. Se realizaron muestreos en un bosque tropical perennifolio (BTP), en un acahual de 4 años (ACH4) y en un acahual de 25 años (ACH25), sometidos al sistema RTQ en suelo Leptosol rendzico. En cada sitio se obtuvieron *in situ* seis registros de conductividad hidráulica a saturación de campo ( $K_{fs}$ ), potencial de flujo mátrico ( $\Phi_m$ ), humedad relativa, infiltración, densidad aparente y porcentaje de humedad. Además se colectaron tres muestras de suelo inalteradas en su estructura para determinar porosidad, así como seis muestras de suelo por sitio para determinar  $N_{tot}$ ,  $P_{disp}$ , pH, MOS y cationes intercambiables ( $Ca^{2+}$ , K,  $Mg^{2+}$ , Na). Los resultados mostraron que el sistema RTQ no afectó significativamente las propiedades hídricas del suelo, sin embargo mostraron una tendencia a disminuir. La  $K_{fs}$  mostró variaciones (0.038; 0.031; 0.030  $cm\ s^{-1}$  para BTP, ACH4 y ACH25 respectivamente). La tasa de infiltración registro la misma tendencia (23.4, 17.47; 14.58  $cm\ min^{-1}$ , para BTP, ACH4 y ACH25 respectivamente) y porosidad (65.09, 59.39; 56.30 % para BTP, ACH4, ACH25, respectivamente). Únicamente el porcentaje de humedad y de porosidad disminuyeron significativamente. Con respecto a las propiedades químicas no se registraron diferencias significativas en  $N_{tot}$ ,  $P_{disp}$ , y pH, mientras que en  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , K y Na tienden a disminuir en el ACH4 pero recuperan sus niveles en el ACH25, para MOS los niveles disminuyeron significativamente a la edad de 25 años. Los resultados indican que el sistema RTQ debe tener ciclos de por lo menos de 25 años o más y que el calcio tiene un papel importante en el mantenimiento de las propiedades hídricas y de nutrimentos.

*Palabras clave:* agricultura tradicional, ecohidrología, micromorfología, uso de fuego, conductividad hidráulica.



## INTRODUCCIÓN

Los bosques tropicales perennifolios (BTP) son alterados con fines agrícolas y ganaderos, a través del sistema RTQ. El sistema RTQ consiste en rozar o deshierbar el bosque, posteriormente derrumbar la vegetación y quemar el material derrumbado e incorporar las cenizas al suelo para favorecer el crecimiento del cultivo durante un periodo continuo de 1 a 5 años (Celedón, 2006). Este periodo de aprovechamiento agrícola es alternando con descansos que pueden ser hasta de 20 años en condiciones ideales (Palm *et. al.*, 2005).

Se ha mencionado que el uso de fuego, puede alterar las propiedades hídricas del suelo, tales como la infiltración, conductividad hidráulica, potencial de flujo mátrico, porosidad, densidad aparente y la retención de humedad (Brooks y Spencer, 1997; Ziegler *et al.*, 2006), sin embargo, existen muy pocos estudios realizados sobre el efecto del sistema RTQ sobre dichas propiedades, destacando el realizado por Rab (1996) en bosques de Eucaliptos en Australia y Are *et al.*, (2009) en bosques tropicales de Nigeria.

Para México, los estudios acerca de las propiedades hídricas en sistemas de RTQ son escasos, destacando el estudio de Celedón (2006) en un BTP de Chiapas, sin embargo no se hicieron registros *in situ* de  $K_{fs}$ , los datos obtenidos fueron a partir de la densidad aparente y textura. Además cabe señalar que los pagos por servicios ambientales hidrológicos (PSAH) son los más solicitados por los dueños de selvas y bosques en México (Chagoya e Iglesias, 2009).

Existe una controversia científica respecto al sistema RTQ, de acuerdo con Alegre y Cassel (1996) y Are *et al.*, (2009) el sistema es sustentable; mientras que para Malner (1996) y Rodenburg *et al.*, (2003) este sistema tiene problemas relacionados con pérdida de nutrimentos.

Los BTP son uno de los hábitats de una importante diversidad biológica y son reguladores del ciclo hidrológico, además capturan y almacenan agua, disminuyen la frecuencia de inundaciones y deslaves, controlan la sedimentación, también regeneran la fertilidad y producción del suelo asimismo capturan bióxido de carbono y ayudan al mantenimiento de la biodiversidad (PNUMA, 2000; SEGOB, 2009).

Por lo anterior, es evidente la necesidad de evaluar las propiedades hídras del suelo de los BTP ubicados en la región media de la cuenca del Papaloapan, la segunda más importante de México, y de esta manera tener un indicador del servicio ambiental hidrológico; además evaluar los efectos del sistema RTQ sobre estas propiedades en acahuales de 4 y 25 años de edad.

## **ANTECEDENTES**

### *Bosques Tropicales Perennifolios (BTP)*

Los BTP representan el tipo de vegetación más rico en especies y el mejor desarrollado, la altitud en la que se les puede encontrar varía entre los 0, 1000 y 1500 m de acuerdo a la clasificación de Koppen corresponden a los subtipos *Af(m)* o *Am*, tiene precipitaciones anuales promedio superiores de 2000 mm y con la presencia de hasta tres o cuatro meses secos *sensu* Koppen (con menos de 60 mm de precipitación mensual). Las temperaturas suelen variar entre 22 y 26°C y presentan una oscilación entre el mes más frío y el más cálido de 5 a 7°C. Los árboles del estrato superior miden más de 30 m de alto y con cierta frecuencia alcanzan los 65 o 75 m, son muy característicos los contrafuertes bien desarrollados y amplios (Rzedowski, 1978; Pennington y Sarukhán, 2005).

La mayoría de los suelos en que se encuentra el BTP tienen buen drenaje y son someros, además de presentar laderas muy pronunciadas. Los materiales geológicos de los que se derivan son sobre todo ígneos o de origen sedimentario calizo; aunque con menos frecuencia también pueden derivarse de rocas metamórficas. Los tipos de suelo más comunes son del tipo leptosol rendzico y vertisoles (Rzedowski, 1978; Pennington y Sarukhán, 2005).

En México su distribución comprende porciones desde la región de la Huasteca, el sureste de San Luis Potosí, norte de Hidalgo y de Veracruz, Campeche, Quintana Roo, y abarca algunas partes de Oaxaca, Chiapas y Tabasco (Rzedowski, 1978).

### *Importancia de la investigación del BTP en el estado de Oaxaca*

En México los estudios sobre sucesión secundaria y el sistema RTQ en BTP iniciaron en la región de Tuxtepec, Oaxaca (Sousa, 1964; Sarukhán, 1964). Dichos estudios comenzaron en 1959, a través de las investigaciones sobre la ecología del “barbasco” (*Discorea composita* Hemsl.), en la Comisión de Estudios sobre la Ecología de Dioscóreas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, esta especie de planta es característica de la vegetación secundaria de zonas cálido-húmedas de la vertiente del Golfo de México, la cual abrió una puerta a la investigación sobre los procesos de regeneración de los ecosistemas tropicales en México (Gómez-Pompa *et al.*, 1976).

Estos estudios de carácter experimental y cuantitativo en los BTP aportaron información para entender el proceso de sucesión de zonas tropicales de México (Sarukhán, 1964; Sousa, 1964; Gómez-Pompa *et al.*, 1976).

### *La cuenca del Papaloapan*

La cuenca del Papaloapan pertenece a la vertiente del Golfo de México y es la segunda cuenca hidrográfica más importante en México con una superficie de 46 517.40 km<sup>2</sup> que se dividen en tres subregiones: alto Papaloapan (11877.90 km<sup>2</sup>), medio Papaloapan (19313.50 km<sup>2</sup>) y bajo Papaloapan (15326 km<sup>2</sup>), con presencia en los estados de Puebla, Oaxaca y Veracruz. Tiene una precipitación media anual entre 2500 y 4000 mm en el curso medio y alto de la cuenca (Pérez y Ortiz, 2002; SEMARNAT, 2005).

La cuenca nace en el estado de Puebla y termina en el estado de Veracruz su descarga llega primero a la Laguna de Alvarado y posteriormente al Golfo de México. Los principales tributarios son los Ríos Grande, Salado, Santo Domingo, Tonto, Tesechoacán, Trinidad, San Juan, Valle Nacional y Blanco. El gran volumen de agua superficial en la cuenca del Papaloapan es generado por lluvias estacionales, así como por las lluvias de origen ciclónico provenientes del Golfo de México y del Océano Pacífico. Estos fenómenos aportan una gran cantidad de agua de escorrentía, la cual se desplaza en lo que constituye la cuenca del Papaloapan, cuya posición noreste-suroeste coincide con la dirección de los vientos alisios, condición que favorece que haya mayor humedad (Pérez y Ortiz, 2002; SEMARNAT, 2005).

La cuenca del Papaloapan alberga una población de 3 millones 608 mil habitantes, de los cuales 55% se encuentra en el estado de Veracruz en 71 municipios, 26% en Oaxaca en 164 municipios y 19% en Puebla en 29 municipios (INEGI, 2004).

La cuenca presenta comunidades vegetales como BTP ubicados en la porción media de la cuenca hasta bosques de coníferas en las porciones más altas, los cuales se unen con una porción árida correspondiente al Valle de Tehuacán, donde se presentan chaparrales y comunidades xerófitas. Por su parte, las porciones bajas de la llanura de inundación se caracterizan por una cobertura totalmente modificada de pastizales y de cultivos de caña de azúcar establecidas en áreas ligeramente más altas de la planicie, las cuales ocupan preferentemente el margen izquierda del Papaloapan (Pérez y Ortiz, 2002).

#### *Sistema roza, tumba y quema (RTQ)*

El sistema RTQ es una práctica agrícola tradicional ampliamente usado en el este y sureste de México (Eastmond y Faust, 2006; Rzedowski, 1978), con periodos de descanso de hasta 20 años. Sin embargo, en regiones tropicales densamente pobladas, los periodos de descanso pueden ser tan cortos como 3 años o menos (Palm *et al.*, 2005).

Existen algunas variaciones de esta práctica dependiendo de las personas involucradas (habitantes indígenas de las áreas forestales, agricultores de pequeña y gran escala, operadores privados), por ejemplo, la utilización de terrenos abiertos para actividades ganaderas, por lo que después de la primera “tumba y quema” se puede obtener cosecha de maíz para autoconsumo o directamente después de la “tumba” se introducen pastos o plantaciones forestales (Celedón, 2006; Palm *et. al.*, 2005; INEGI, 2004; Rzedowski, 1978). Como resultado de la práctica agrícola de la RTQ se desaparece el bosque clímax original y el área se convierte en un mosaico formado por una serie de comunidades vegetales secundarias de tipo herbáceo, arbustivo y arbóreo llamadas “acahuales” (Rzedowski, 1978).

El sistema RTQ es considerado como una de las prácticas agrícolas más conservadoras y sustentables porque después de la quema, la ceniza ayuda a fertilizar el suelo, esto es por la liberación inmediata de los nutrientes minerales ocluidos como el  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  y  $P_{disp}$  (Alegre y Cassel, 1999; Kayode, 2009).

Sin embargo, existe la otra visión respecto a ésta práctica agrícola porque señalan que el sistema RTQ degrada fuertemente los bosques tropicales perennifolios, altera la biodiversidad, daña el suelo, contribuye a reducir los recursos genéticos, reduce la belleza escénica del paisaje y de su valor recreativo, propicia el azolve de presas y reduce su capacidad de infiltración del agua (SEMARNAT, 2005a; CONAFOR, 2006; CDI, 2008).

#### *Efecto del sistema RTQ sobre las propiedades hídricas*

De acuerdo con Are *et al.*, (2009), el sistema RTQ puede afectar las propiedades hídricas del suelo tales como la conductividad hidráulica, sorptividad, densidad aparente, porosidad total y contenido de humedad. Sin embargo, el potencial de flujo mátrico no ha sido evaluado en zonas tropicales y en México no se ha estudiado los efectos del sistema RTQ sobre las propiedades hídricas del suelo.

*Conductividad hidráulica* ( $K$ ) es la medida de la capacidad del suelo para transmitir agua bajo un gradiente potencial hidráulico. La conductividad hidráulica a saturación de campo ( $K_{fs}$ ) se refiere a la conductividad hidráulica saturada del suelo que contiene aire atrapado (Reynolds y Elrick, 1985). Ésta medida se puede obtener de manera directa *in situ* en condiciones de saturación por medio de permeámetros Amozometro y de Guelp (Zimmerman *et al.*, 2006; Are *et al.*, 2009), y de manera indirecta a partir de la textura (Celedón, 2006; Han *et al.*, 2008).

De acuerdo con Rab (1996), el uso del fuego puede incrementar la  $K_{fs}$  en un bosque de *Eucaliptus*, derivados de materiales geológicos metamórficos y un suelo granítico, registró incrementos no significativos (31.58 a 35.12 mm h<sup>-1</sup> y 19.20 a 24.91 mm h<sup>-1</sup>, respectivamente). Zimmermann *et al.*, (2006), registraron valores de 206, 201 y 227 mm h<sup>-1</sup>, en un bosque tropical primario, en un bosque secundario y en plantación de cacao con plátano; respectivamente. Sin embargo, Are *et al.*, (2009) reportaron en bosques tropicales sobre un Alfisol en Nigeria un decremento significativo de 536.4 a 1519.2 mm h<sup>-1</sup>.

*Potencial de flujo mátrico* ( $\Phi_m$ ) es la medida de la capacidad del suelo para adsorber el agua, por fuerzas de capilaridad, a través de una unidad de sección transversal por unidad de tiempo (Reynolds y Elrick, 1985). Hasta el momento, no se han encontrado estudios sobre el efecto del sistema RTQ sobre ésta variable hidrológica.

*Sorptividad (S)* cuantifica el efecto de la capilaridad de un líquido en movimiento en un material poroso y depende del potencial de flujo mátrico (Culligan *et al.*, 2005). En el trabajo realizado por Are *et al.*, (2009) encontraron que el sistema RTQ ocasionó una disminución significativa de 104.2 a 42.85 cm h<sup>-1/2</sup> en esta propiedad.

*Infiltración* es el proceso de entrada de agua en el suelo indicando el volumen de agua que entra en una determinada sección transversal por unidad de tiempo y depende principalmente de las condiciones de la superficie del suelo, del contenido de agua y de la conductividad hidráulica (Robichaud, 2000). El uso del fuego en la agricultura disminuye la infiltración significativamente en bosques tropicales de acuerdo con Are *et al.*, (2009), quienes registraron valores de 6.24 a 2.70 mm h<sup>-1</sup>. Malner (1996) encontró una disminución significativa en un suelo Acrisol háplico, bajo aprovechamiento forestal de 154 a 36.7 mm h<sup>-1</sup>. Sin embargo, Zimmermann *et al.*, (2006) no registraron afectaciones significativas en el bosque tropical, en el bosque secundario, en una plantación de cacao con plátano en un *Kandiudult* al sur de la Amazonia en Brasil (1533, 1033 y 1155 mm h<sup>-1</sup>, respectivamente).

*Porosidad* es la propiedad relacionada con el control de las tasas de agua y el movimiento del aire a través del suelo, se calcula con datos de la densidad real y la densidad aparente. Los suelos bien agregados contienen un balance de macroporos y microporos, éste balance permite transmitir el agua y el aire rápidamente a través de los macroporos y retener el agua por capilaridad en los microporos (DeBano *et al.*, 1998). En trabajos preliminares se señala que el sistema RTQ no afecta significativamente la porosidad, al respecto Are *et al.*, (2009) no encontraron diferencias significativas teniendo resultados de 55.3 a 52.3 %. Por otra parte, Rab (1996) encontró que el sistema no afecta significativamente en un suelo de origen metamórfico donde registró incrementos de 70.6 a 72%; así mismo no encontró afectaciones significativas en suelo granítico, donde disminuyó de 62 a 58%.

*Densidad aparente* es la masa del suelo seco por unidad de volumen aparente expresado en g cm<sup>-3</sup> (DeBano *et al.*, 1998). El sistema RTQ incrementa la densidad aparente según Are *et al.* (2009); sin embargo, estos incrementos no fueron significativos ya que aumentó de 1.23 a 1.24 g cm<sup>-3</sup>; de igual manera Rab (1996) no encontró diferencias significativas (0.53 a 0.64 g cm<sup>-3</sup> y 0.9 a 0.88 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente) entre zonas no

afectadas y afectadas por RTQ, Alegre y Cassel (1996) de igual manera no encontraron diferencias significativas en un Paleudult típico en Perú bajo el sistema de RTQ, de 1.2 a 1.3 g cm<sup>-3</sup>.

*Contenido de humedad* es el contenido de agua contenida en el suelo al momento del muestreo y controla la distribución de agua aportadas por precipitaciones, infiltración, escurrimiento superficial y la evaporación en la superficie de la Tierra, es de vital importancia en las aplicaciones de hidrología (Sahoo *et al.*, 2008). Are *et al.* (2009) encontraron que el sistema RTQ no ocasiona cambios significativos en los primeros 15 cm del suelo porque varió de 11 a 9 %.

#### *Propiedades químicas del suelo*

El pH influye en la  $K_{fs}$  en un Andosol alofánico se registraron los valores mayores de  $K_{fs}$  a un pH 6 y valores menores se registraron tanto a pH de 3 y 11. (Nakagawa e Ishiguro, 1994). Ketterings *et al.*, (2002) mostraron en un Ferrasol Orthico en Indonesia bajo plantaciones de caucho (*Hevea brasiliensis*) con el sistema de RTQ que las quemaz incrementan la disponibilidad de fósforo a corto plazo pero a largo plazo se incrementa la absorción.

Hölscher *et al.*, (1997) al investigar el efecto del sistema RTQ en un Ultisol en Brasil encontraron incrementos significativos del pH en parcelas de 2 y 10 años de barbecho (4.6 a 4.78, respectivamente); capacidad de intercambio catiónico (20.4 a 23.9  $\mu\text{molc g}^{-1}$ , respectivamente), Ca extraíble (12.7 a 15.6  $\mu\text{molc g}^{-1}$ , respectivamente) y un decremento significativo en el contenido de C y N en parcelas de barbecho de 7 años en comparación con las de cultivo de primer año (12.8 a 10.9 g kg<sup>-1</sup> y 0.9 a 0.8 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente).

#### *Análisis de efectos edafológicos por medio de secciones delgadas.*

La porosidad y la micromorfología del suelo estudian principalmente la forma y distribución de los agregados del suelo. Se basan en el análisis de secciones delgadas preparadas a partir de muestras no alteradas del suelo, además es un método que se utiliza actualmente para evaluar los efectos sobre diversos factores ecológicos (fauna, incendios,

cultivos, sequías, etc.) en las propiedades hídricas del suelo (Davidson *et al.*, 2002; Pires *et al.*, 2007; Vera *et al.*, 2007; Chung *et al.*, 2008).

#### *Pago por servicios ambientales*

La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) implementó desde el 2003 un esquema de pago por servicios ambientales (PSA), con el objetivo de reducir la conversión de la cobertura forestal por medio de una compensación económica a los dueños de los bosques (Chagoya e Iglesias, 2009).

Los pagos de servicios ambientales hidrológicos (PSAH) son los que resultan del ciclo hidrológico, producto de la capacidad de los ecosistemas para captar agua así mantener la oferta hídrica disponible para la sociedad (Constanza *et al.*, 1998) y tienen un papel clave en áreas de importancia hidrológica donde otras políticas habían sido ineficaces; ya que provee incentivos económicos para evitar la deforestación en áreas donde hay serios problemas de agua relacionados directamente con la deforestación (Muñoz *et al.*, 2009).

La importancia de estudiar los efectos de las propiedades hídricas en el sistema RTQ es la incorporación del programa de PSA en varias áreas naturales; sin embargo, actualmente no existe un método para evaluar el servicio ambiental hidrológico (SAH) porque la valoración económica del agua es relativamente nuevo y se desconoce la cantidad de litros de agua que se están protegiendo, si se ha incrementado el caudal en la áreas bajo PSAH, además son pocos los estudios que incorporen el funcionamiento hidrológico donde se considere de forma científica. Muchos de los datos están basados en extrapolaciones de investigaciones y bases de datos anteriores y no en datos biofísicos tomados específicamente en el área de estudio (INE, 2004 y Fregoso, 2006). Es importante mencionar que de todos los pagos de servicios ambientales el PSAH es el más solicitado por los dueños de bosques y selvas en México (Chagoya e Iglesias, 2009).

Además es necesario realizar investigaciones específicas sobre los efectos del sistema RTQ en las propiedades hídricas del suelo en acahuals de diferente edad y poder fundamentar si realmente el sistema debe de ser incorporado al PSAH y de esta forma los



campesinos y comunidades agrarias que practican este sistema de forma milenaria se vean beneficiados por el PSAH.

**CON BASE EN LO ANTERIOR ESTE ESTUDIO PRETENDE RESPONDER A LAS SIGUIENTES INTERROGANTES:**

¿Qué valores presentan las propiedades hídricas del suelo del bosque tropical perennifolio (BTP)?

¿El sistema roza tumba y quema afecta el servicio ambiental hidrológico de un bosque tropical perennifolio de la cuenca del Papaloapan en la región de Oaxaca?

¿A mayor edad del acahual se recupera el servicio ambiental hidrológico?

**POR LO QUE SE PLANTEAN LOS SIGUIENTES OBJETIVOS:**

- a) Determinar las propiedades hídricas del suelo de un bosque tropical perennifolio de la cuenca del Papaloapan, Oaxaca, México.
- b) Evaluar el efecto del sistema agrícola roza, tumba y quema sobre las propiedades hídricas del suelo en un bosque tropical perennifolio y acahuales de 4 y 25 años de edad.
- c) Determinar la relación entre el cambio de las propiedades hídricas con el cambio en las propiedades químicas del suelo en el bosque tropical y en los acahuales de 4 y 25 años.

## ZONA DE ESTUDIO

*Ubicación:* El ejido Cerro Marin se encuentra en el municipio de San Juan Bautista Valle Nacional dentro del distrito de Tuxtepec, Oaxaca en las coordenadas 17°48' latitud N y 96°16' longitud O y con una altitud de 366 m (Figura 1).



Figura 1. Ubicación de la zona de estudio mostrando los parches de acahuales de diferentes edades y el bosque tropical perennifolio en el ejido Cerro Marin, Municipio de San Juan Bautista Valle Nacional, Oaxaca.

*Clima.* La zona de estudio presenta un clima tipo Af(m)(e)gw que corresponde a cálido húmedo, con lluvias todo el año, mayormente en verano (García, 2004). La temperatura media anual mayor es de 24°C, con temperatura mínimas medias anuales de 18°C. Las precipitaciones oscilan entre 3000 y 4000 mm (Trejo, 2004).

*Geología.* El relieve premontañoso consiste en estructuras plegadas de rozas calizas arrecifales, sedimentos arcillosos, calcáreos, calizas y pedernales del Cretácico superior. Los procesos geomorfológicos dominantes son los de karstificación (Centeno-García, 2004)

e INEGI, 2004). La roca en esta zona es caliza tipo walckestone la cual presenta 15% hierro en su composición.

*Edafología.* Los suelos que predominan en la zona son leptosoles rendzicos (WRB, 2007). Se caracterizan por tener profundidades de 10 cm o menos, se desarrollan sobre rocas calizas y son muy ricos en materia orgánica (SEMARNAT, 2005a).

*Topografía.* Se ubica en los macizos montañosos de la Sierra Madre de Oaxaca y limita con la Planicie Costera del Golfo (Ortiz *et al.*, 2004) caracterizados por abundantes lomeríos y barrancas profundas.

*Hidrología:* La zona de estudio forma numerosas cañadas y son parte de la vertiente del río Valle Nacional o Papaloapan. La Cuenca del Papaloapan es la segunda cuenca hidrográfica más importante de México con una superficie de 51025.52 km<sup>2</sup> (SEMARNAT, 2005).

*Tipo de vegetación.* La vegetación característica en el estrato arbóreo posee una importante riqueza de especies con diversas alturas; está compuesto por especies como *Terminalia amazonia*, *Cordia alliodora*, *C. megalantha*, *Calophyllum brasiliense*, *Dialium guianense*, *Tapirira mexicana*, *Elaeagia uxpanapensis*, *Dussia mexicana*, *Pera barbellata*, *Brossium alicastrum*, *Spondias radkolferi*, *Cymbopetalum pensiflorum*, *Slonea tuerckheimii*, *Brossium guianense*, *Nectandra membranacea*, *Hieronyma oblonga* y *Ficus insípida*, y en el estrato bajo contiene elementos de dominancia de *Pleuranthodendron lindenii*, *Ficus obtusifolia*, *Guatterria galeottiana*, *Cymbopetalum baillonii*, *Pleuranthodendron lindenii*, *Ficus obtusifolia*, *Guatterria galeottiana*, *Cymbopetalum baillonii* y *Miconia* sp (Torres, 2004).

*Demografía y actividades económicas.* El ejido Cerro Marin se encuentra dentro del municipio San Juan Bautista Valle Nacional, del distrito de Tuxtepec, Oaxaca. Cerro Marin tiene una población de 741 habitantes, de la cual el 70% son indígenas predominando las etnias chinanteca y zapoteca. El 88.6% de personas no tienen derecho a servicios de salud y el 25% de la población mayor de 15 años es analfabeta (SEGOB, 2002).

La principal actividad económica en la región es la agricultura y el sistema RTQ es el más utilizado, predominando los cultivos de tabaco, café, maíz, frijol, arroz, caña de azúcar, frutos y cacao; así como la ganadería, pesca, comercio y turismo (SEGOB, 2002).

## MÉTODO

### *Elección de sitios de muestreo.*

Para estudiar los efectos del sistema RTQ sobre el SAH en un BTP en Oaxaca se establecieron tres sitios de estudio en el ejido Cerro Marin, San Juan Bautista Valle Nacional, lugar donde nos facilitaron los terrenos para el estudio por el Sr. Severino Alemán Hernández, chinanteco originario de esta región. Los sitios fueron un BTP que fue comparado con sitios adyacentes afectados por la práctica de RTQ: un acahual de 4 (edad mínima de descanso) y 25 años (edad máxima de descanso), con el fin de que las variables fisiográficas, edafológicas y geológicas fueran constantes para evitar variaciones por ellas. Todos los sitios se desarrollan sobre roca caliza, con procesos kársticos, y tipo de suelo Leptosol rendzico (WRB, 2007), aproximadamente a 366 m de altitud, exposición sur, con pendientes de 25°.

### *Historia de los sitios*

Los sitios de estudios no mostraron signos de actividad ganadera debido a la gran cantidad de afloramientos rocosos, y sin disturbios humanos adicionales a los de la práctica de RTQ. Los árboles tenían un diámetro mayor de 1 m y de una altura mayor de 30 m en las especies arbóreas. La forma en que realizan el sistema en estos sitios es primero rozar, tumbar y quemar el BTP, cultivar durante uno o dos años maíz y frijol, dejar descansar la parcela durante 20 años mínimamente y volver a utilizarla.

### *Sitios de muestreo*

El BTP (Figura 2a) conservado se caracteriza por tener estrato arbóreo mayor de 30 m, sin vestigios de tala, RTQ o ganadería, la especie dominante es *Brosimum alicastrum*, nombre común (n.c.) “ojoche”. (Pennington y Sarukhán, 2005).

El acahual de 4 años (Figura 2b) ocupa aproximadamente 1 hectárea, predomina el estrato arbustivo, la cual presenta una cobertura cercana al 90%. Las especies dominantes son el aguacate (*Persea americana Mill*), y “tres lomos” (*Cupania dentata*). No se detectan aún especies del estrato arbóreo.

El acahual de 25 años (Figura 2c) ocupa aproximadamente 1 hectárea, vuelve a predominar *Brosimum alicastrum*, con presencia de *Cecropia obtusifolia* n.c. “chancarro” (Pennington y Sarukhán, 2005).



Figura 2. Sitios donde se realizaron los muestreos, 2a corresponde al bosque tropical perennifolio (BTP), 2b al acahual de 4 años (ACH4) y 2c al acahual de 25 años (ACH25).

### *Determinación de propiedades hidrológicas*

#### *Tamaño y distribución de poros*

En cada sitio se ubicaron y tomaron aleatoriamente tres muestras de suelo inalteradas en su estructura en un horizonte superficial utilizando cajas tipo Kubiena (Bullock *et al.*, 1999). Las cajas se enterraron verticalmente diez cm y se extrajeron excavando cuidadosamente por los lados de la caja, procurando que la muestra no se viera afectada. Según Plagliali y

Kutilek (2008), tres muestras inalteradas son suficientes para obtener tres secciones delgadas por sitio.

Cada caja se secó lenta y gradualmente bajo la sombra. Los bloques inalterados se impregnaron con poliéster insaturada y monómero estireno con una relación 7:3 para su endurecimiento; una vez endurecidas las muestras se cortaron con un disco con punta de diámante. Las secciones se colocaron en portaobjetos (6 x 9 cm) y se pulieron hasta 30  $\mu\text{m}$  de espesor. Las secciones delgadas fueron analizadas bajo un microscopio petrográfico marca Olympus BX51 con compensador y se describieron los poros de acuerdo con el sistema de Bullock *et al.* (1999). La cuantificación de los poros se realizó a través de un analizador de imágenes IMAGE PRO PLUS 6.0, para ello de cada sección delgada se tomaron 20 imágenes (Figura 5) con microscopio petrográfico objetivo 2x . Se determinó el porcentaje de porosidad total (Pires *et al.*, 2007).

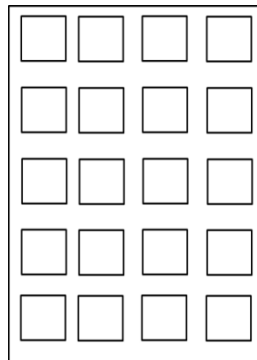


Figura 3. Representación en que se tomaron las fotomicrografías en cada sección delgada

*Densidad aparente ( $\rho_a$ ) y porcentaje de humedad.* Por medio del método del cilindro propuesto por Font (1980), se determinó tomando tres muestras en cada sitio con un cilindro de cobre, para después en laboratorio secarlas en horno a 105 °C hasta peso constante y relacionar el peso seco con el volumen de la muestra para  $\rho_a$  de acuerdo con la siguiente fórmula:

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

Para humedad:

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{\text{masa de suelo seco (g)}}{\text{peso inicial del suelo (g)}} * 100$$

*Porcentaje de humedad relativa de saturación de campo.* En cada sitio se obtuvieron 6 registros con un humidímetro Kelwey. Una lectura del 100% con este humidímetro corresponde con la capacidad de saturación de campo del suelo (Ángeles, 2010).

*Temperatura del suelo.* Se midió con un termómetro de sólidos TEL TRU, se realizaron seis determinaciones para los primeros 5 cm del suelo.

*Determinación de la conductividad hidráulica ( $K_{fs}$ ), potencial mátrico ( $\Phi_m$ ) e infiltración.* Se utilizó el permeámetro de Guelph Modelo 2800K1, el cual basa su principio en el bulbo húmedo constante, opera con el principio del sifón de Mariotte y se estima la  $K_{fs}$ ,  $\Phi_m$  e infiltración (Reynolds y Elrick, 1985). Estas medidas pueden ser utilizadas para relacionarlas con la porosidad del suelo (Reatto *et al.*, 2007).

Se realizaron cuatro registros en cada sitio, se preparó un agujero de aproximadamente 6 cm de diámetro y 10 cm de profundidad utilizando una barrena, incluida en el conjunto de implementos del permeámetro. Se colocó el permeámetro en el agujero y se niveló el agua a 5 cm y se procedió a medir el nivel de agua del permeámetro cada 10 segundos. Cuando las lecturas del nivel de agua presentaron una diferencia constante tres veces consecutivas se obtiene la tasa de infiltración a la primera profundidad y  $R_1$  (Flores y Alcalá, 2005).

Posteriormente se niveló el agua a 10 cm y se procedió nuevamente a medir el nivel de agua en el permeámetro como a la profundidad de 5 cm y se obtuvo la tasa de infiltración a la segunda profundidad y  $R_2$ .

Cálculos para tasa de infiltración:

$$\text{Infiltración} = L_1 - L_2 / (t * 60) = \text{cm/min}$$

$L_1$  = lectura 1

$L_2$  = lectura 2

t = tiempo en seg

60 = para convertir seg a min

Para poder calcular la  $K_{fs}$  y  $\Phi_m$  se realizan los siguientes cálculos preliminares:

$$R_1' = R_1/60 = \text{cm/seg}$$

$$R_2' = R_2/60 = \text{cm/seg}$$

$R_1'$  = Lectura constante a nivel de 5 cm

$R_2'$  = Lectura constante a nivel de 10 cm.

*Conductividad hidráulica de saturación de campo ( $K_{fs}$ )*

$$K_{fs} = [(a)(\text{Constante del reservorio})(R_2')] - [(b)(\text{Constante del reservorio})(R_1')]$$

Donde  $a = 0.0041$  y  $b = 0.0054$

*Potencial de flujo mátrico ( $\Phi_m$ )*

$$\Phi_m = [(c)(\text{Constante del reservorio})(R_1')] - [(d)(\text{Constante del reservorio})(R_2')]$$

Donde  $c = 0.0572$  y  $d = 0.0237$

*Análisis de propiedades químicas.*

Se tomaron tres muestras de suelo alteradas en cada sitio de muestro a profundidad de 0-2.5 cm y otras de 2.5-5.0 cm, porque es la profundidad a la que afecta el sistema RTQ (DeBano *et al.*, 1998), en los acahuales, así como en el bosque conservado para determinar N, P, MOS, pH y cationes intercambiables (Ca, Mg, Na y K).

Una vez en laboratorio las muestras se secaron a temperatura ambiente, se tamizaron en una malla de 2 mm y se realizaron las determinaciones de nitrógeno total, fósforo extraíble, MOS, pH y cationes intercambiables.

*Nitrógeno total.* Se realizó a través del método semimicro-kjeldahl modificado (SEMARNAT, 2000).

*Fósforo disponible.* Se determinó el fósforo extraíble por el método de Bray y Kurtz para suelos ácidos y neutros (SEMARNAT, 2000).

*Materia orgánica del suelo.* Se evaluó a través del contenido de carbono orgánico con el método de Walkey y Black (Jackson, 1964 y SEMARNAT, 2000).

*pH.* Se determinó por medio del método electrométrico, el cual se basa en la determinación de la actividad del ion H mediante el uso de un electrodo cuya membrana es sensitiva al



H<sup>+</sup>, en una suspensión sobrenadante de una mezcla de relación suelo: agua 1:2 (SEMARNAT, 2000).

*Cationes intercambiables.* Se evaluó por el método de extracción con acetato de amonio (CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>)1N pH 7 y cuantificación por absorción atómica y fotometría de llama (ISP, 1994 y SEMARNAT, 2000).

### **Análisis estadístico**

Los datos obtenidos en porcentaje, tales como: el de porosidad total, MOS, N, y humedad relativa del suelo; se transformaron por medio del arcoseno de la raíz cuadrada del porcentaje, para ajustarlos a la distribución normal requerida para el análisis estadístico (Zar, 1999). Éstos datos, excepto porosidad total, y los de conductividad hidráulica, densidad aparente, potencial de flujo mátrico e infiltración, así como los de P, Ca, Na, K y Mg se sometieron a una prueba de comparación de medias *t student* y para porosidad total se sometió a un análisis de varianza (ANOVA) de una vía y una prueba de comparaciones múltiples de Scheffe para detectar si existen diferencias significativas, a un nivel de 0.05, entre las propiedades hidrológicas del suelo del BTP y las de acahuales del sistema RTQ, mediante el programa STATA SE 8. (Márques, 1988 y Zar, 1999).

Los datos de las propiedades hidrológicas K<sub>fs</sub> e infiltración se relacionaron con las propiedades químicas, por medio de un análisis de regresión múltiple, con el programa STATA SE 8.

## RESULTADOS

### *Efecto del sistema RTQ sobre las propiedades hídricas del suelo*

*Infiltración.* Se realizaron 38 registros. En el cuadro 1 y figura 4.1 muestran que el BTP presenta el mayor promedio, seguido del ACH4 y del ACH25 ( $23.40 \pm 16.52$ ;  $17.47 \pm 12.62$ ;  $14.58 \pm 12.78$  cm min<sup>-1</sup>, respectivamente), no presentan diferencias significativas ( $P = 0.27$ ).

*Conductividad hidráulica.* Se realizaron 19 registros, 6 para BTP, 4 para ACH4 y 9 para ACH25. En el cuadro 1 y figura 4.2 se muestra que el mayor valor se presentó en BTP, seguido del ACH4 y del ACH25 ( $0.038 \pm 0.024$ ,  $0.031 \pm 0.014$  y  $0.030 \pm 0.024$  cm seg<sup>-1</sup>, respectivamente). No se detectaron diferencias significativas ( $P=0.74$ ).

*Potencial de flujo mátrico.* Se obtuvieron 8 registros, 2 para BTP, 3 para ACH4 y 3 para ACH25. En el cuadro 1 y figura 4.3 se observa que el mayor valor se obtuvo en BTP, seguido de ACH4 y ACH25 ( $0.33 \pm 0.28$ ;  $0.10 \pm 0.10$  y  $0.03 \pm 0.03$  cm<sup>2</sup> seg<sup>-1</sup>, respectivamente). No se encontraron diferencias significativas ( $P=0.15$ ).

*Porcentaje de humedad.* Se realizaron 9 mediciones, 3 por sitio. Se registró el mayor valor en BTP, seguido de ACH25 y ACH4 ( $40.10 \pm 2.63$ ;  $34.67 \pm 5.45$  y  $27.72 \pm 1.25$  %, respectivamente) como se muestra en el cuadro 1 y figura 4.4. Se registró diferencia significativa entre el BTP y el ACH4 ( $P=0.95$ ).

*Densidad aparente.* Se realizaron 6 determinaciones por sitio. En el cuadro 1 y figura 4.5 se muestra que el mayor valor se obtuvo en ACH25, seguido del ACH4 y el BTP ( $0.627 \pm 0.10$ ;  $0.626 \pm 0.11$  y  $0.54 \pm 0.08$  g cm<sup>3</sup>, respectivamente). No se registraron diferencias significativas ( $P=0.60$ ).

*Porcentaje de humedad a saturación de campo.* Se realizaron 6 determinaciones por sitio, en el cuadro 1 y figura 4.6 se observa que el mayor valor se presentó en ACH4, seguido de

ACH25 y BTP ( $53.33 \pm 23.16$ ;  $51.16 \pm 13.86$  y  $49.16 \pm 18.55$  %, respectivamente). No se encontraron diferencias significativas ( $P=0.95$ ).

*Porosidad.* Se obtuvieron 3 secciones delgadas de cada sitio y se analizaron 49 imágenes del BTP, 51 del ACH4 y 57 del ACH25. En el cuadro 1 y figura 4.7 se muestra que el mayor valor de porcentaje de porosidad total se presentó en BTP, seguido del ACH4 y del ACH25 ( $65.09 \pm 13.46$ ,  $59.39 \pm 15.14$  y  $56.3 \pm 14.64$  %, respectivamente), se detectó una diferencia significativa entre el BTP y ACH25 ( $P=0.04$ ).

### ***Efecto del sistema RTQ sobre las propiedades químicas del suelo***

Se efectuaron un total de 36 mediciones de cada una de las siguientes parámetros químicos: magnesio, calcio, fósforo, potasio, sodio, pH, materia orgánica y nitrógeno, tres para cada sitio, a la profundidad de 0 a 2.5 cm y tres para la profundidad de 2.5 a 5 cm en cada sitio no afectado y afectados por el sistema RTQ (BTP, ACH4 y ACH25, respectivamente).

*Fósforo disponible.* En el cuadro 2 y en la figura 5.1, muestran que el valor más alto se obtuvo en ACH25 ( $61.30 \pm 40.53$  mg kg<sup>-1</sup>), seguido del BTP y finalmente el ACH4 ( $57.98 \pm 40.53$ ;  $43.21 \pm 18.78$ , respectivamente). No se detectaron diferencias significativas entre los sitios afectados y no afectados por el sistema RTQ a las dos profundidades ( $P=0.65$ ). Los valores se clasifican como alto de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000.

*Nitrógeno.* En el cuadro 2 y figura 5.2 se muestra que la mayor concentración se presenta en ACH25, seguido de BTP y ACH4 ( $0.30 \pm 0.09$ ;  $0.28 \pm 0.11$ ; y  $0.23 \pm 0.10$  %, respectivamente). Únicamente se detectó una diferencia significativa entre el ACH4 y el ACH25 a la profundidad de 2.5 a 5 cm ( $P=0.02$ ). Los valores se clasifican como muy alto de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000.

*Magnesio.* En el cuadro 2 y figura 5.3, se observa un incremento significativo ( $P<0.008$ ) en ACH25 con respecto al BTP y ACH4 ( $3.05 \pm 0.75$ ;  $1.60 \pm 0.79$ ;  $1.41 \pm 0.35$  cmol (+) kg<sup>-1</sup>,

respectivamente). Se registraron valores medios para BTP y ACH4 y altos para ACH25 de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000.

*Potasio.* En el cuadro 2 y figura 5.4, se muestra que la mayor concentración se registró en ACH25, seguido del BTP y ACH4 ( $0.44 \pm 0.13$ ;  $0.33 \pm 0.18$ ;  $0.26 \pm 0.09$  cmol (+) kg<sup>-1</sup>, respectivamente). Se detectaron diferencias significativas entre el ACH4 y el ACH25 (P=0.007). Los valores para BTP y ACH25 se clasifican como medios y para ACH4 como bajos de acuerdo con NOM-021-SEMARNAT-2000.

*Sodio.* En el cuadro 2 y figura 5.5 se observa que el mayor valor se encuentra en ACH25, seguido de BTP y ACH4 ( $0.169 \pm 0.04$ ;  $0.164 \pm 0.04$ ;  $0.13 \pm 0.03$  cmol (+) kg<sup>-1</sup>, respectivamente). Se detectaron diferencias significativas entre el ACH4 y el ACH25 (P=0.05).

*Calcio.* En el cuadro 2 y figura 5.6 muestran que la mayor concentración se presentó en BTP, seguida de ACH25 y ACH4 ( $14.63 \pm 0.32$ ;  $14.42 \pm 0.23$ ;  $13.62 \pm 0.61$  cmol (+) kg<sup>-1</sup>, respectivamente). Se presentaron diferencias significativas entre el BTP y ACH4 (P=0.003) y entre el ACH4 y el ACH25 (P=0.02). Los valores se clasifican como muy altos de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000.

#### *Otras propiedades del suelo*

*pH.* El mayor valor se presentó en el BTP, seguido del ACH25 y el ACH4 ( $6.11 \pm 0.21$ ;  $5.86 \pm 0.26$ ; y  $5.7 \pm 0.23$ , respectivamente) como lo muestran el cuadro 2 y figura 5.7. No se detectaron diferencias significativas entre los sitios afectados y no afectados por el sistema RTQ a ambas profundidades (P=0.06). Los valores se clasifican como moderadamente ácidos de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000.

*Materia orgánica.* El mayor valor se registró en BTP ( $9.34 \pm 5.13$  %), seguido de ACH4 y el ACH25 ( $5.92 \pm 5.62$ ;  $3.92 \pm 0.72$  %, respectivamente) como lo muestran el cuadro 2 y figura 5.8. Se detectó una diferencia significativa entre el BTP y el ACH25 a la profundidad de 0 a 2.5 cm ( $P=0.04$ ). Los valores se clasifican como altos para ACH4 y ACH25 y como muy altos para BTP.

Cuadro 1. Propiedades hídricas del suelo (media  $\pm$  desviación estándar) en un bosque tropical perennifolio y en acahuales del ejido Cerro Marín, Valle Nacional, Oaxaca; (BTP= bosque tropical perennifolio, ACH4 = acahual de 4 años, ACH25 = acahual de 25 años. Las letras diferentes indican diferencias significativas ( $\alpha=0.05$ ).

Sitio	Infiltración (cm min <sup>-1</sup> )	K <sub>f</sub> (cm seg <sup>-1</sup> )	$\Phi_m$ (cm <sup>2</sup> seg <sup>-1</sup> )	Porosidad (%)	Humedad a saturación (%)	$\rho_a$ (g cm <sup>-3</sup> )	Humedad (%)
BTP	23.4 $\pm$ 16.52a	0.038 $\pm$ 0.02a	0.33 $\pm$ 0.28a	65.09 $\pm$ 13.46a	49.16 $\pm$ 18.55a	0.54 $\pm$ 0.08a	40.10 $\pm$ 3.22a
ACH4	17.47 $\pm$ 12.62a	0.031 $\pm$ 0.01a	0.10 $\pm$ 0.10a	59.39 $\pm$ 15.14ab	53.33 $\pm$ 23.16a	0.62 $\pm$ 0.11a	27.72 $\pm$ 1.53b
ACH25	14.58 $\pm$ 12.78a	0.03 $\pm$ 0.024a	0.03 $\pm$ 0.03a	56.3 $\pm$ 14.64b	51.16 $\pm$ 13.86a	0.62 $\pm$ 0.10a	34.67 $\pm$ 6.685ab

Cuadro 2. Propiedades químicas del suelo (media  $\pm$  desviación estándar) en un bosque tropical perennifolio y en acahuales del ejido Cerro Marín, Valle Nacional, Oaxaca; (BTP= bosque tropical perennifolio, ACH4 = acahual de 4 años, ACH25 = acahual de 25 años. Las letras diferentes indican diferencias significativas ( $\alpha=0.05$ ).

Sitio	$N_{\text{tot}}$ ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	MOS (%)	$P_{\text{disp}}$ ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	pH	Cationes intercambiables			
					Ca	Mg $\text{cmol (+) kg}^{-1}$	K	Na
<b>BTP</b>	$0.28 \pm 0.11\text{a}$	$9.3 \pm 5.13\text{a}$	$57.98 \pm 40.53\text{a}$	$6.11 \pm 0.21\text{a}$	$14.63 \pm 0.32\text{a}$	$1.60 \pm 0.79\text{a}$	$0.33 \pm 0.18\text{ab}$	$0.164 \pm 0.04\text{ab}$
<b>ACH4</b>	$0.23 \pm 0.10\text{a}$	$5.92 \pm 5.62\text{ab}$	$43.21 \pm 18.78\text{a}$	$5.7 \pm 0.23\text{a}$	$13.62 \pm 0.61\text{b}$	$1.41 \pm 0.35\text{a}$	$0.26 \pm 0.09\text{b}$	$0.13 \pm 0.03\text{b}$
<b>ACH25</b>	$0.30 \pm 0.09\text{a}$	$3.92 \pm 0.72\text{b}$	$61.30 \pm 40.53\text{a}$	$5.86 \pm 0.26\text{a}$	$14.42 \pm 0.23\text{a}$	$3.05 \pm 0.75\text{b}$	$0.44 \pm 0.13\text{a}$	$0.169 \pm 0.04\text{a}$

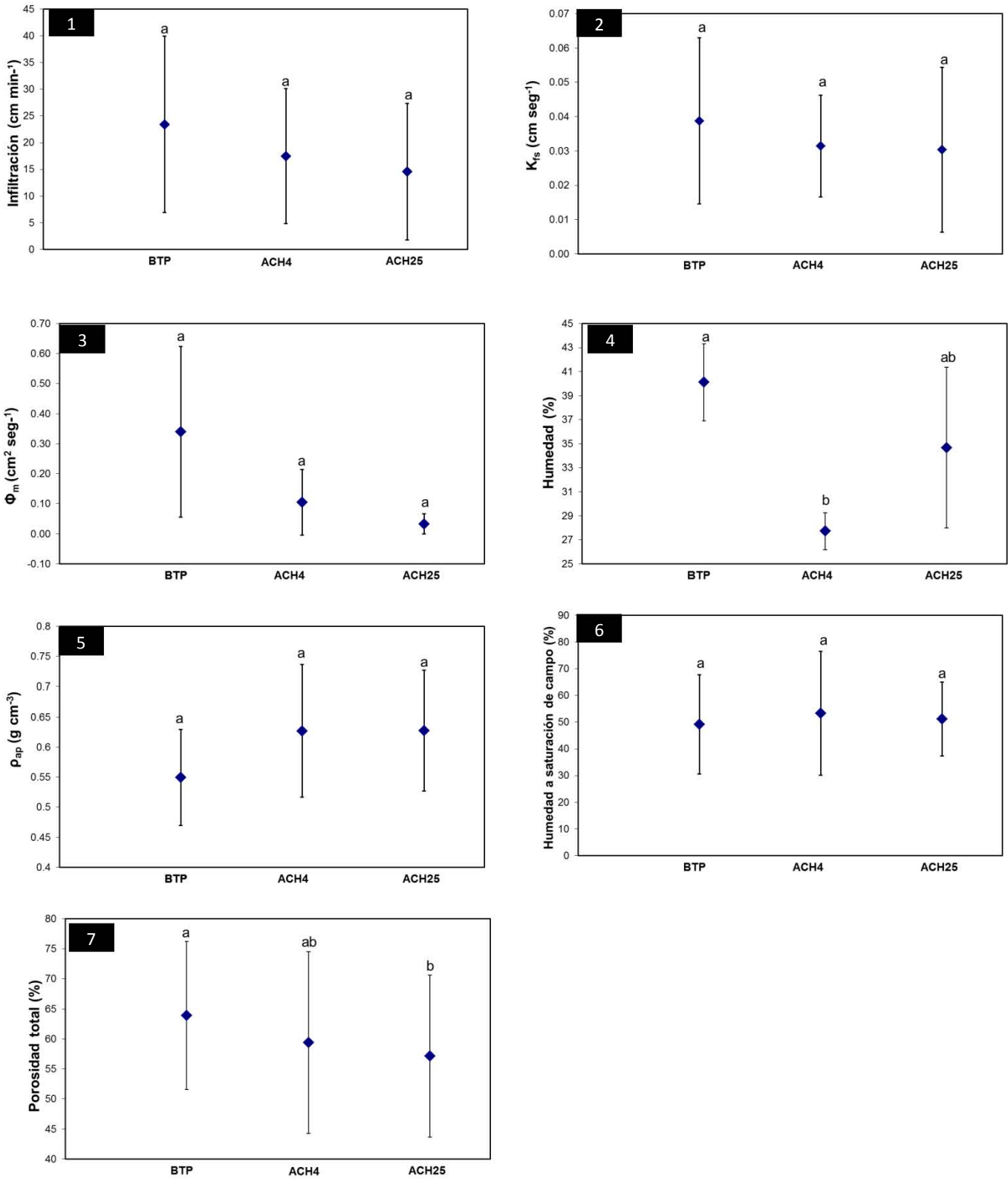


Figura 4. Efecto del sistema roza, tumba y quema (RTQ) sobre las propiedades hídricas del suelo en acahuales y un bosque tropical perennifolio del ejido Cerro Marin, Valle Nacional, Oaxaca; (BTP= bosque tropical perennifolio, ACH4 = acahual de 4 años, ACH25 = acahual de 25 años). Las letras diferentes indican diferencias significativas ( $\alpha \leq 0.05$ ).



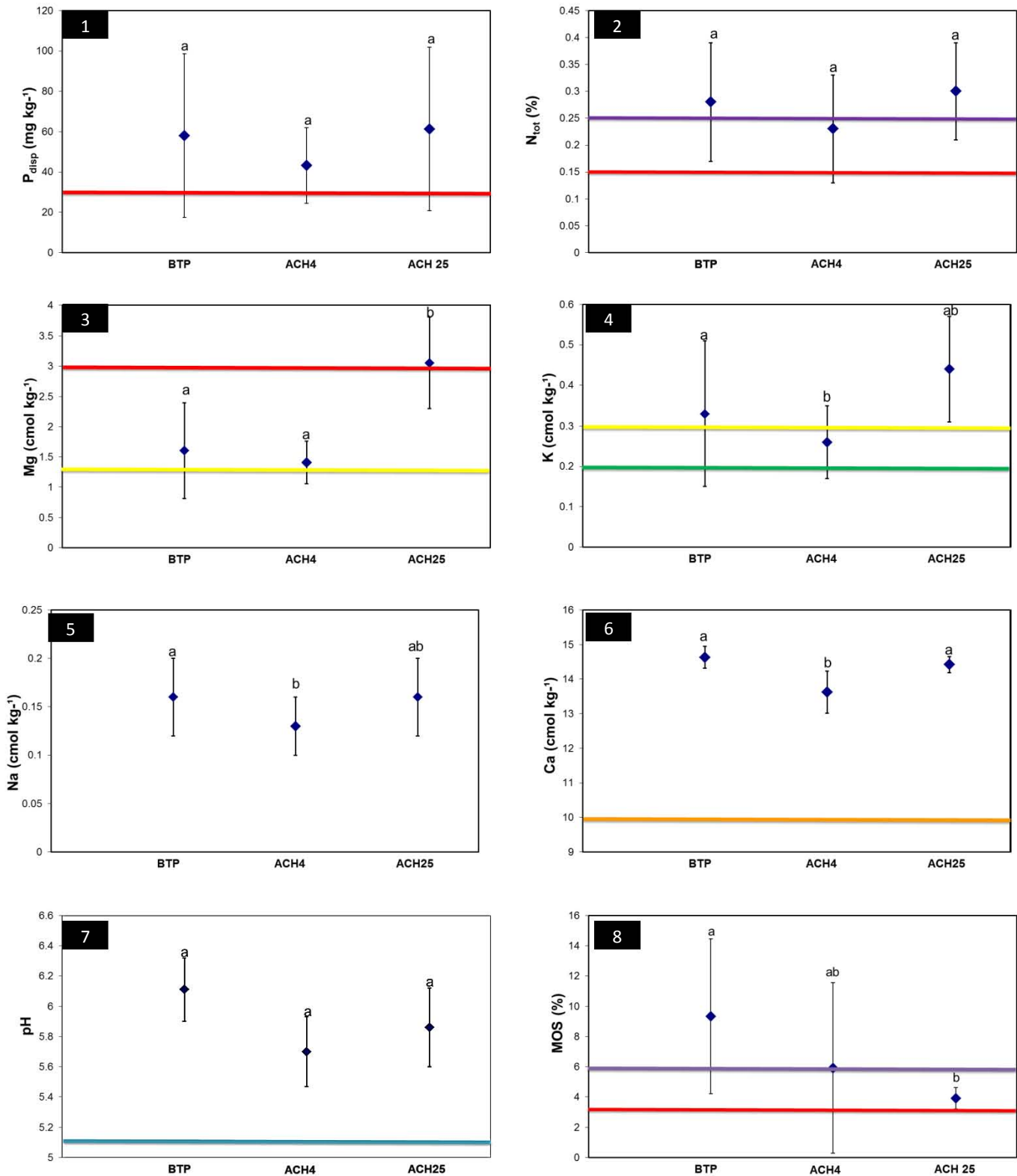


Figura 5. Efecto del sistema roza, tumba y quema (RTQ) sobre las propiedades químicas del suelo en acahuales y un bosque tropical perennifolio del ejido Cerro Marin, Valle Nacional, Oaxaca; (BTP= bosque tropical perennifolio, ACH4 = acahual de 4 años, ACH25 = acahual de 25 años). Las líneas de colores representan la clasificación de acuerdo a la NOM-021- SEMARNAT (2001); morado= muy alto, rojo= alto, amarillo = media, verde = bajo, naranja = muy bajo, azul = moderadamente ácido). Las letras diferentes indican diferencias significativas ( $\alpha \leq 0.05$ ).

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### *Efecto del sistema RTQ sobre las propiedades hídricas del suelo*

El sistema RTQ no afecta las propiedades hídricas del suelo, si bien en el BTP se registran los valores más altos de  $K_{fs}$ , tasa de infiltración,  $\Phi_m$ , humedad relativa y porosidad total, el análisis no mostró diferencias significativas con las mismas propiedades en los acahuales.

Aún cuando se ha señalado que los incendios generan fusión de agregados (Ángeles, 2010) y compactación de suelos, el análisis de secciones delgadas mostró que el sistema RTQ genera una baja fusión, en ACH4 representaron un 18% y en ACH25 presentó un 7% (Figura 6 y 7). Al respecto Giovannini y Lucchesi (1997) indican que el hierro, presente en los minerales del suelo a temperaturas elevadas, favorece la fusión entre agregados. En este estudio dicha fusión solo ocurrió en los porcentajes mencionados, lo que se atribuye a que el calcio, un elemento abundante en el suelo, limita la liberación de hierro (Duchaufour, 1984) y por tanto la fusión de agregados.

Por lo anterior la  $K_{fs}$  de esta zona se ubica dentro de la clase de muy alto ( $\geq 36 \text{ cm h}^{-1}$ ) de acuerdo con Schoeneberger *et al.* (2002). Además los valores de  $K_{fs}$  ( $1368 \text{ mm h}^{-1}$ ), son similares a los encontrados en otros bosques tropicales. Ziegler *et al.* (2006) registraron en un BTP en Malasia, una  $K_{fs}$  de  $1493 \text{ mm h}^{-1}$ , mientras que Zimmerman *et al.* (2006) en un BTP en Brasil reportó  $206 \text{ mm h}^{-1}$ . (Figura 6). Los resultados de  $K_{fs}$  indican que el BTP capta  $13\,947\,120 \text{ L ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$  y en ACH4 y ACH25  $11\,369\,546$  y  $10\,929\,452.4 \text{ L ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , respectivamente. Lo que indica que éstos suelos ante una precipitación extrema como ocurrió en el huracán Stan (CONAGUA, 2005), de  $113\,750 \text{ L/ha h}$ , estos sitios pueden infiltrar esa cantidad de agua hacia el perfil del suelo.

Por otra parte, también los valores de infiltración se ubican dentro de la categoría de muy altos ( $\geq 20 \text{ in h}^{-1}$ ) de acuerdo con la clasificación de Schoeneberger *et al.* (2002). A nivel mundial algunos bosques tropicales presentan valores muy bajos. Al respecto Ziegler *et al.* (2004) reportan valores de  $K_{fs}$  32, 67 y de  $63 \text{ mm h}^{-1}$ , para un bosque secundario joven, un bosque secundario intermedio y para un bosque primario, respectivamente, al norte de Vietnam.

Los altos valores de  $K_{fs}$  y de tasa de infiltración se atribuye a la alta porosidad que presentan estos suelos ( $65\% \pm 13.46$ ). Sander (2002) realizó un análisis micromorfológico en diversas áreas tropicales y encontró que la porosidad total varía de 45 a 85%.

La alta porosidad en el BTP se atribuye a la alta actividad biológica (raíces, insectos), como se observó en las secciones delgadas (Figuras 7, 8 y 9) y es acorde con lo mencionado por Zimmerman *et al.* (2010).

El sistema RTQ no afecta la porosidad y se atribuye a que estos poros son altamente estables debido a la actividad biológica. Al respecto Pagliali y Kutilek (2008), encontraron que los revestimientos de los poros tienen un papel importante en su estabilidad. De esta forma la actividad biológica produce revestimientos de calcita las cuales al hidratarse se expanden y alargan los poros, generando una alta macroporosidad. Al respecto Bullock *et al.* (1999), indican que los rellenos de calcita pueden alargar a los poros originales.

Por otra parte la alta porosidad ocasiona que los suelos presenten valores bajos de densidad aparente y una alta retención de humedad de acuerdo con Schoeneberger *et al.* (2002), se podría atribuir a la abundancia de calcio. Al respecto Johnston y Tobácz (2002) señalan que el calcio, debido a su alta energía de hidratación ocasiona que las moléculas de agua sean difícilmente removidas. La energía de hidratación es el proceso por el cual los cationes inorgánicos atraen a las moléculas de agua.

La densidad aparente podría ser un indicador de las propiedades hídricas del suelo, ya que, a mayor densidad aparente la infiltración,  $K_{fs}$ ,  $\Phi_m$ , y porcentaje de porosidad total presentan los valores más bajos.

Con base en los resultados anteriores, se puede afirmar que las propiedades hídricas del suelo de éstos BTP de esta región no se ven afectados por el sistema RTQ. Y el calcio tiene un papel fundamental en la creación de macroporos y el mantenimiento de la alta porosidad.

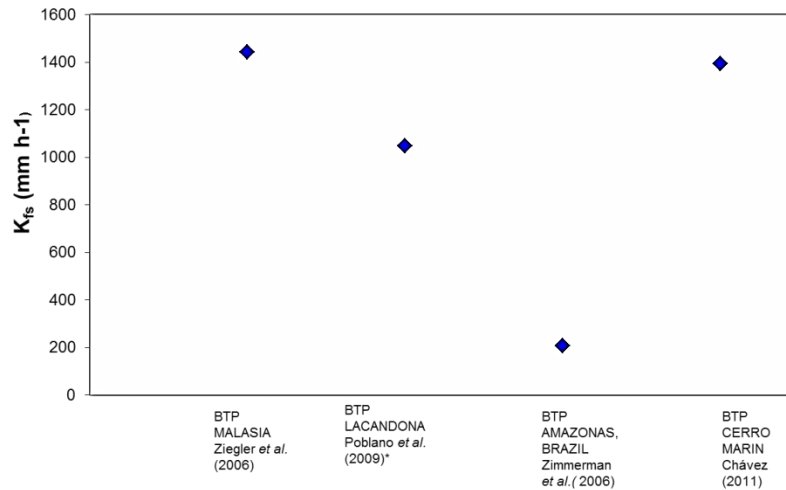


Figura. 6. Conductividad hidráulica ( $K_{fs}$ ) (media) del suelo en bosque tropical perennifolio de distintos sitios.

#### *Efecto del sistema RTQ sobre las propiedades químicas del suelo*

Los suelos de los BTP, ACH25 y ACH4 presentaron porcentajes de N en niveles catalogados como muy alto, de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000, en tanto son de nivel alto para P,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , y de  $K^+$  como nivel medio, lo que puede ser atribuido a la adición de nutrientes a partir de las cenizas, las cuales permanece incluso en el ACH25 como lo muestran las secciones delgadas (Figura 9). Al respecto Hölscher *et al.* (1997) y Johnson *et al.* (2001), han encontrado que la adición de cenizas incrementan los nutrientes.

Por otra parte, la ubicación de los sitios de estudio sobre pendientes fuertes podrían suponer una pérdida de nutrientes con las lluvias torrenciales típicas de estas zonas (Soto *et al.*, 1995; Juo y Manu, 1996; DeBano *et al.*, 1998; Rodenburg *et al.*, 2003 y Béliveau *et al.*, 2009); sin embargo, en este trabajo no se detectaron pérdidas lo que se puede atribuir a las altas concentraciones de calcio. Al respecto Gutiérrez *et al.* (1998), encontraron que la presencia de calcio, favorece la sedimentación de partículas, como las cenizas, y de esta manera se evita la pérdida por escurrimientos. Además para P, DeBano *et al.* (1998),

señalan que al combinarse con el  $\text{Ca}^{2+}$  forma apatita y también precipita en suelos alcalinos, lo que evita pérdidas y mantiene las concentraciones similares al BTP.

Las variaciones de los nutrientes  $\text{Mg}^{2+}$ , K, Na, P y N mostraron que en el ACH25 los valores tienden a ser similares o incluso mayores a los del BTP, considerándose que se requiere una edad mínima de 25 años para que la concentración de los nutrientes se recuperen. Ésta variación se atribuye a que el ACH25 presenta una gran productividad y se puede deber al gran aporte de hojas, las cuales contienen grandes cantidades de  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y N. (Pritchett, 1990), lo que coincide con los resultados encontrados con Johnson *et al.* (2001).

La MOS presentó valores de muy alto de acuerdo a la clasificación de SEMARNAT (2000), además disminuye en el ACH4 y alcanza el valor de alto en el ACH25. Los resultados obtenidos son similares a los obtenidos por Yemefack *et al.* (2006), quienes encontraron una tendencia a disminuir la MOS los primeros dos años y a aumentar hasta los doce años; sin embargo, contrastan con los obtenidos con Mendoza-Vega *et al.* (2005). Esta tendencia encontrada se podría atribuir a las altas tasas de producción de hojarasca en bosques secundarios de hasta 12 años; mientras que en los bosques secundarios jóvenes (<20 años) la materia orgánica es rápidamente incorporada al suelo debido a la alta tasa de mineralización (Brown y Lugo, 1990; Pritchett, 1990 y Khormali *et al.* 2009) que puede ser atribuida a un alta tasa de actividad microbiana y enzimática (Grandy *et al.* 2009).

Los valores de  $\text{Ca}^{2+}$  fueron altos (SEMARNAT, 2000) en el BTP, ACH4 y ACH25, presentando diferencias significativas entre el BTP y ACH4 de 6.11 a 5.7  $\text{cmol}_{(+) } \text{kg}^{-1}$ ; y entre el ACH25 y ACH4 de 14.42 a 13.62  $\text{cmol}_{(+) } \text{kg}^{-1}$ , sin embargo la concentraciones de los tres sitios es de alto. Los valores de pH para los tres sitios se clasifican como moderadamente ácido (SEMARNAT, 2000). Hay una tendencia a incrementar el pH y  $\text{Ca}^{2+}$ , como lo reportan Doner y Grossl (2002); Lindell *et al.* (2010), con el desarrollo del acahual y se le puede atribuir al contenido de carbonato en el suelo de origen geológico. Además a un origen biológico; ya que, bacterias y hongos contribuyen a la biomineralización y formación de calcita (Dixon y Schulze, 2002) que es integrada al suelo.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la práctica de RTQ en esta comunidad, reflejan que el periodo de recuperación de las propiedades químicas del bosque más

apropiado es a la edad de 25 años, lo que fundamenta el conocimiento tradicional de las personas que practican el sistema RTQ en estas zonas de dejar descansar el acahual por periodos mayores de 20 años; sin embargo, es necesario hacer más estudios con bosques secundarios de mayores edades y en sitios con otros tipos de suelo en BTP afectado por el sistema RTQ.

#### *Incendios en el BTP.*

Al hacer el análisis de secciones delgadas se encontraron fragmentos carbonizados de material leñoso y reveló que los BTP anteriormente fueron afectados por incendios (Figura 7), posiblemente de origen natural, se descarta los incendios de origen antropogénico debido a que esta zona fue habitada a partir de los años 60's por pobladores provenientes de la región náhuatl del centro del estado de Veracruz (García, 2007). También se descarta que estos fragmentos carbonizados provengan de otros lugares ya que los sitios de muestreo se ubican en las partes altas de la ladera.

Además Koonce y González-Cabán (1990), Rodríguez (2008) y Morfin-Rios *et al.* (2010), indican que los incendios naturales son raros en los BTP, pero también señalan que los BTP pueden generar incendios severos. Además, Morfin-Rios *et al.* (2010) señalan que los incendios forman parte de la dinámica de estos bosques los cuales son afectados por incendios de alta severidad y con un período de retorno mayor a los 100 años. Rodríguez (2008) señala que después de los huracanes se acumula una gran cantidad de material combustible que genera incendios severos en la siguiente temporada de seca debido a que hay una mayor radiación penetra en el suelo, como ocurrió en Chiapas después del huracán Gilberto.

Asimismo, Snook (1993) ha encontrado que los incendios promueven la presencia de ciertas especies como caoba (*Swietenia macrophylla*), la cual se considera como una de la especies representativas de los BTP. Además se han encontrado que hay diversos mecanismos de adaptación al fuego (Bourgeau-Chávez *et al.*, 2000) y las especies se han clasificado en diferentes categorías: a) las invasoras, las cuales son especies pioneras que llegan al sitio como es el caso de los helechos (Ramírez *et al.*, 2007; Rodríguez, 2008); b) las que evitan el fuego, en la cual su estrategia es invadir el bosque después de una

cronosecuencia sucesional y; c) las tolerantes al fuego que se reproducen vegetativamente después de los incendios, porque las partes vegetativas como raíces y los troncos sobreviven y son capaces de brotar nuevamente. Por lo anterior, se puede decir que los incendios tienen efectos positivos sobre la vegetación; sin embargo, hacen falta más estudios al respecto.

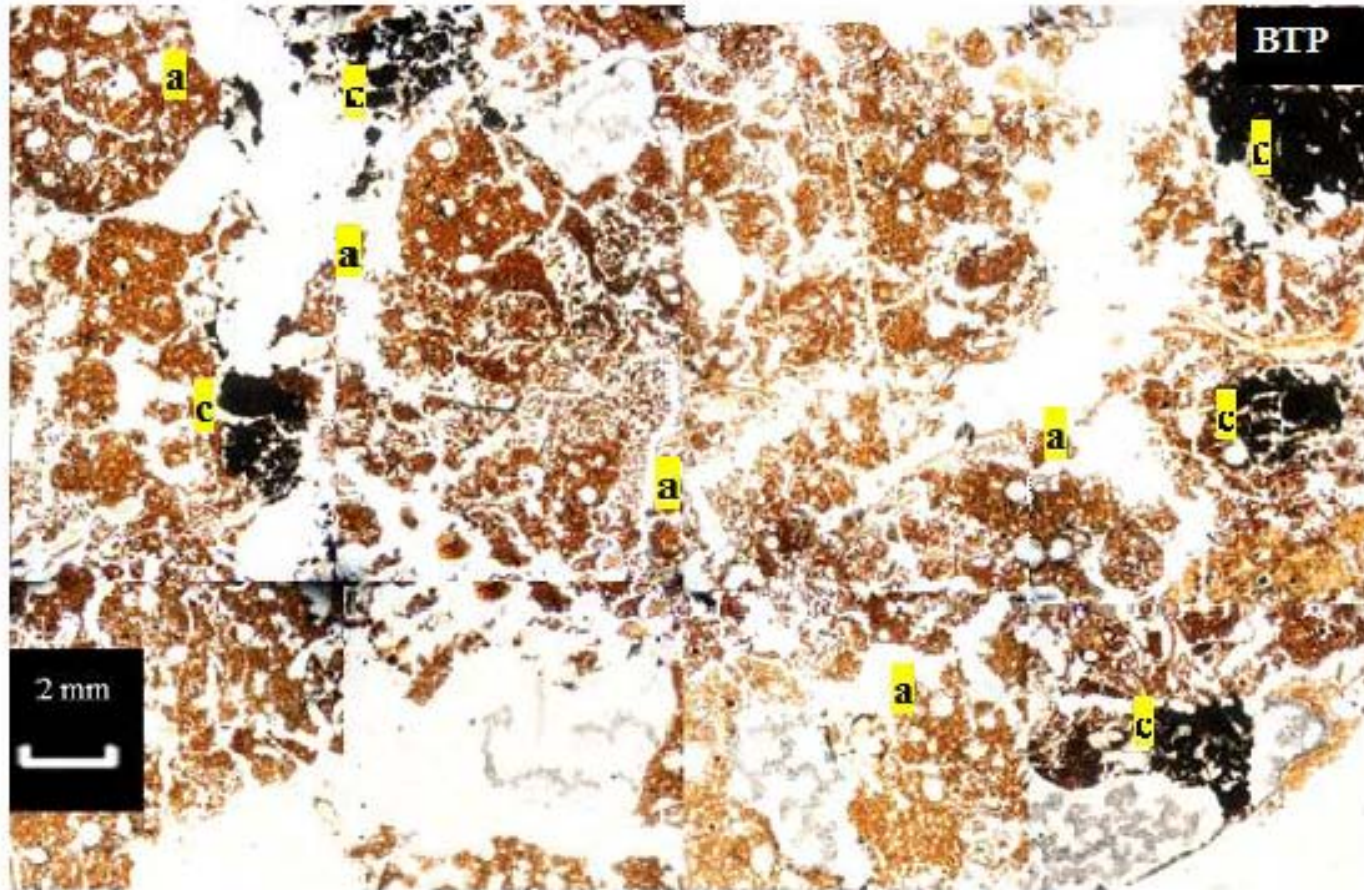


Figura 7. Lámina delgada a partir de fotomicrografías a 2X con luz polarizada plana del bosque tropical perennifolio (BTP) que muestra la porosidad (espacio en blanco). Las partículas negras son partículas de material carbonizado (letra c). La letra "a" representa los poros de origen biológico (poros de empaquetamiento compuesto)



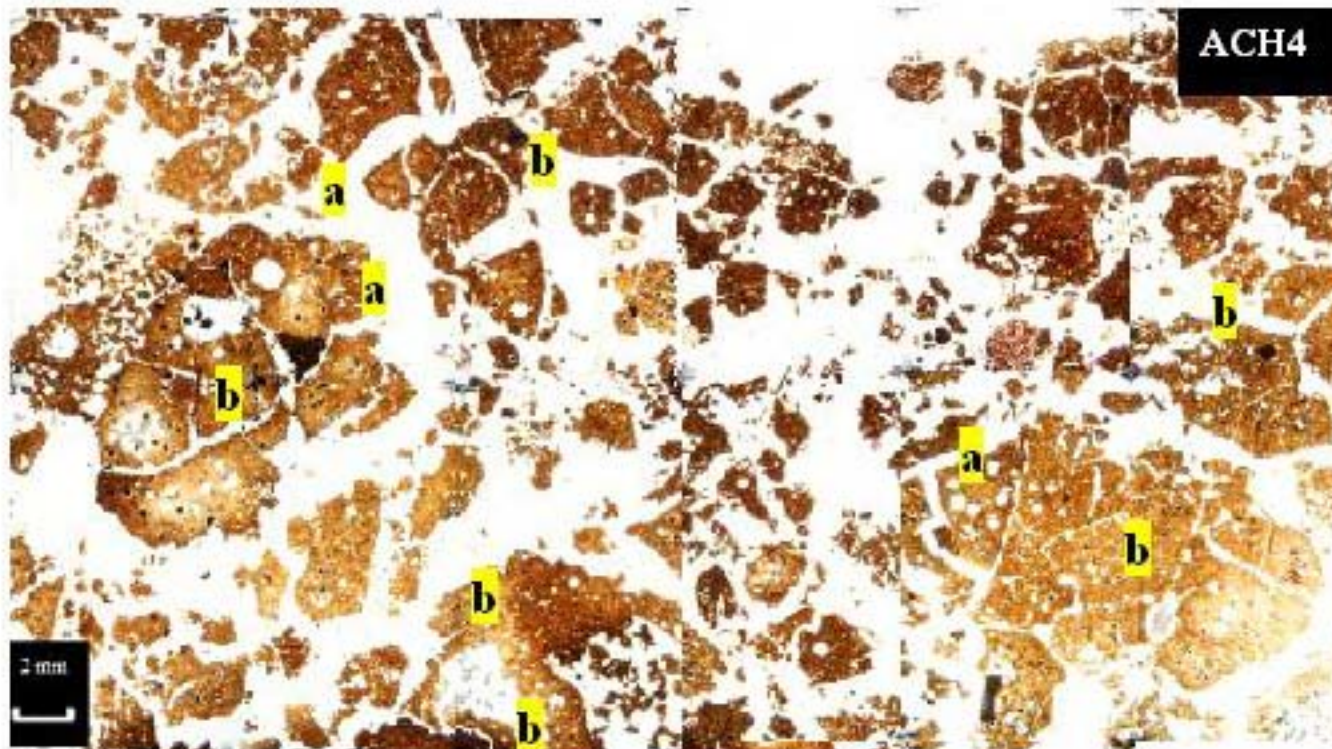


Figura 8. Lámina delgada a partir de fotomicrografías a 2X con luz polarizada plana del acahual de 4 años (ACH4) que muestra la porosidad (espacio en blanco). Las partículas negras son partículas de material carbonizado. La letra "a" representa los poros de origen biológico, "b" fusión entre los agregados.

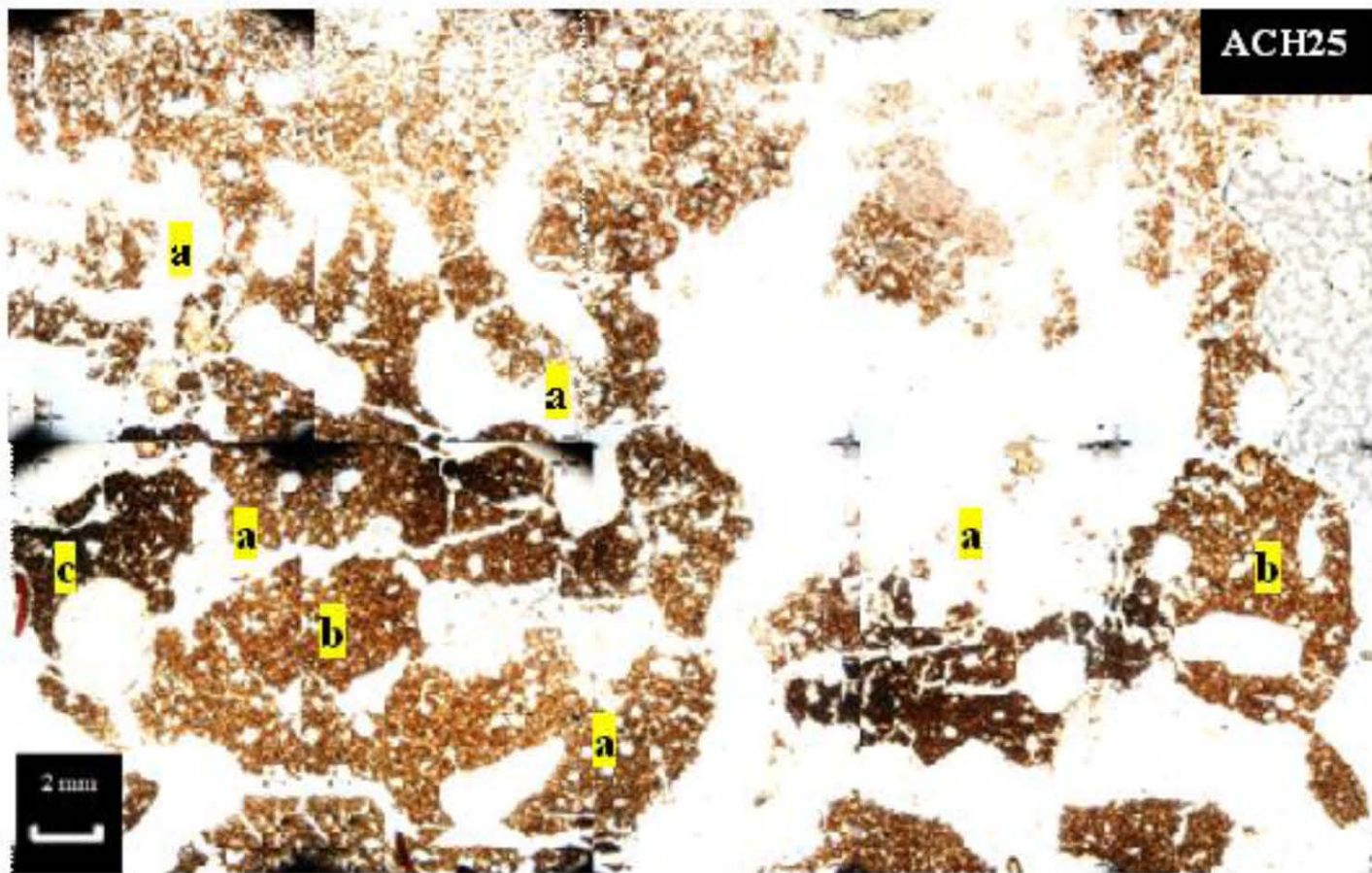


Figura 9. Lámina delgada a partir de fotomicrografías a 2X con luz polarizada plana del acahual de 25 años (ACH25) que muestra la porosidad (espacio en blanco). Las partículas negras son partículas de material carbonizado. La letra 'a' representa los poros de origen biológico, 'b' fusión entre los agregados.

## CONCLUSIONES

El sistema roza, tumba y quema no afecta las propiedades hídricas ni las propiedades químicas del suelo.

A la edad de 25 años los valores de las propiedades físicas y químicas del suelo alcanzan valores similares a los del bosque tropical perennifolio, por lo que la práctica del sistema RTQ requiere un intervalo mínimo de ésta edad, como es practicado en este lugar.

Las propiedades hídricas y químicas del suelo depende en gran medida de la porosidad y ésta a su vez depende del ión calcio, que tiene una función fundamental en la creación y el mantenimiento de poros así como en la retención de humedad, además ocasiona sedimentación de partículas y no permite que los nutrimentos del suelo disminuyan manteniendo la fertilidad, por lo que el sistema roza, tumba y quema es sustentable y de ésta manera se mantiene el servicio ambiental hidrológico.

Los resultados anteriores fortalecen la idea de este sistema roza, tumba y quema es sustentable en este tipo de suelo donde las concentraciones de calcio son altas, sin embargo, es necesario hacer más estudios acerca de este sistema en otros tipos de suelo.

## LITERATURA CITADA.

- Alegre, J.C. y Cassel, D.K. 1996. Dynamics of soil physical properties under alternative systems to slash-and-burn. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **58**: 39-48.
- Ángeles, C.E.R. 2010. Efectos ecológicos de los incendios forestales sobre el bosque de oyamel. *Tesis de doctorado*. Colegio de Postgraduados. México.
- Are, S.K., Oluwatosin, G.A., Adeyolanu, O.D. y Oke, A.O. 2009 . Slash and burn effect on soil quality of an Alfisol: Soil Physical Properties. *Soil and Tillage Research* **103**: 4-10.
- Béliveau, A., Lucotte, M., Davidson, R., do Canto, L. L.O. y Paquet, S. 2009. Early Hg mobility in cultivated tropical soils one year after slash-and-burn of the primary forest in the Brazilian Amazon. *Science of the Total Environment* **407**: 4480-4489.
- Bonell, M., Purandara, B.K., Venkatesh, B., Krishnaswamy, J., Acharya, H.A.K., Singh, U.V., Jayakumar, R. y Chappell, N. 2010. The impact of forest use and reforestation on soil hydraulic conductivity in the Western Ghats of India: Implications for surface and sub-surface hydrology. *Journal of Hydrology* **391**: 47-62.
- Bourgeau-Chávez, L.L., Alexander, M.E., Stocks, B.J. y Kasischke, E.S. 2000. Distribution of Forest Ecosystems and the Role of Fire in the North American Boreal Region. *In: Caldwell, M.M., Heldmaier, G., Lange, O.L., Mooney, H.A., Schulze, E.D., Sommer, U. 2000. Ecological Studies, Analysis Studies*. Vol. 138. Springer.
- Brooks, S.M. y Spencer, T. 1997. Changing Soil Hydrology due to Rain Forest Logging: an Example from Sabah Malaysia. *Journal of Environmental Management* **49**: 297-310.
- Brown, S. 1990. Tropical secondary forest. *Journal of Tropical Ecology*. **6**: 1-32.
- Bullok, P., Federoff, N., Jongerius, A., Stoops, G. y Tursina, T. 1999. *Manual para la descripción de secciones delgadas de suelos* (1a traducción al español). Programa de Edafología-Colegio de Postgraduados. México.
- Celedón, M.H. 2006. Impacto del sistema agrícola de roza, tumba y quema sobre las características de tres unidades del suelo en la selva Lacandona de Chiapas. *Tesis*

- de maestría en Ecología y Ciencias Ambientales*. Facultad de Ciencias. UNAM, México.
- Centeno-García, E. 2004. Configuración Geológica del Estado. En: García, M. A., Ordoñez, M. J., Briones, S. M. Eds. *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología-UNAM-FOCN-WWF. México.
- CONAGUA. 2005. Resumen de la temporada de ciclones tropicales 2005. En: *Análisis de la temporada de Huracanes 2005 en México*. CONAGUA. México.
- Constanza, R., D'Arge, R., De Groot, R., Farber, Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R., Paruelo, J., Raskin, G., Sutton, P. y Van der Belt. 1998. The value of the world's services and natural capital. *Ecological Economics* **25**: 3-15.
- Culligan, P.J., Ivanov, V. y Germaine, J.T. 2005. Sorptivity and liquid infiltration into dry soil. *Advances in Water Resources* **28**:1010-1020.
- Chagoya, J.L. e Iglesias, G.L. 2009. Esquema de pago por servicios ambientales de la Comisión Nacional Forestal. En: Sepúlveda, L. C., Ibrahim, M. 2009. *Políticas y sistemas de incentivos para el fomento y adopción de buenas prácticas agrícolas como medida de adaptación de buenas prácticas agrícolas como medida de adaptación al cambio climático en América Central*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Costa Rica.
- Chung, C.H., Giménez, D. y Won, Y.S. 2008. Morphology, lacunarity and entropy of intra-aggregate pores: Aggregate size and soil management effects. *Geoderma* **146**: 83-93.
- Davidson, D.A., Bruneau, P.M., Grieve, I.C. y Young, I.M. 2002. Impacts of fauna on and upland grassland soil as determined by micromorphological analysis. *Applied Soil Ecology* **20**: 133-143.
- DeBano, L.F., Near, D. G. y Efolliot, P.F. 1998. *Fire's Effects on ecosystems*. John Wiley and Sons, Inc. EUA.
- Descroix, L., Gonzalez, B. J.L. y Candervaere, J. P. 2002. An experimental analysis of hydrodynamic behavior on soils and hillslopes in a subtropical mountainous environment (Western Sierra Madre, Mexico). *Journal of Hydrology* **266**: 1-14.

- Dixo, J.B. y Schulze, D.G. 2002. *Soil Mineralogy with Environmental Applications*. Soil Science Society of America Book Series. EUA.
- Dixon, J.B. y D.J., Schulze, 2002. *Soil Mineralogy with Environmental Applications*. Soil Science. Society of America. EUA.
- Doner, H. y Grossl, P.R. 2002. Carbonates and Evaporites. En: Amonette, J. E., Blear, W. F., Schulze, D. G., Dixon, J. B. 2002. *Soil Mineralogy with Environmental Applications*. Soil Science of America. EUA.
- Duchaufour, P. 1984. *Edafogénesis y Clasificación*. Masson. España
- Eastmond, A. y Faust, B. 2006. Farmers, fires, and forest: a green alternative to shifting cultivation for conservation of Maya forest?. *Landscape and urban planning*. **74**:267-284.
- FAO. 2002. *Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020, Informe Nacional México*. SEMARNAT-FAO. Roma.
- Flores, D.L. y Alcalá, M.J. 2005. *Manual de Procedimientos Analíticos*. UNAM-Instituto de Geología. México.
- Fregoso, A. 2006. La oferta y el pago de los servicios ambientales hídricos: una comparación de diversos estudios. *Gaceta Ecológica* **78**: 29-46.
- García, B.L. 2007. San Agustín, sitio ideal para el ecoturismo en Jacatepec. *Microrregión Chinantla*. **7**:9.
- García, E. 2004. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. UNAM. México.
- Giovannini G. y Lucchesi S. 1997. Modifications induced in soil physico-chemical parameters by experimental fires at different intensities. *Soil Science* **162**:479-486.
- Gómez-Poma, A., Del Amo, R.S., Vázquez-Yañez, C. y Butanda, C.A. 1976. *Investigaciones sobre la regeneración de selvas altas en Veracruz*. Continental. México.
- Grandy, S.A., Strickland, M.S., Lauber, C.L. y Bradford, M.A., Fierer, N. 2009. The influence of microbial communities, management, and soil texture on soil organic matter chemistry. *Geoderma* **150**: 278-286.

- Gutiérrez, C. M.C., Stoops, G.G., Ortiz, S.C.A. 1998. Carbonato de calcio en los suelos del ex lago de Texcoco. *TERRA Latinoamericana* **16**: 11-19.
- Han, H., Giménez, D. y Lilly, A. 2008. Textural averages of saturated soil hydraulic conductivity predicted from water retention data. *Geoderma* **146**: 121-128.
- Han, H., Giménez, D. y Lilly, A. 2008. Textural averages of saturated soil hydraulic conductivity predicted from water retention data. *Geoderma* **146**: 121-128.
- Hancock, G.R., Murphy, D. y Evans, K.G. 2010. Hillslope and catchment scale soil organic carbon concentration: An assessment of the role of geomorphology and soil erosion in an undisturbed environment. *Geoderma* **155**: 36-45.
- Hölscher, D., Ludwig, B., Möller, R.F. y Fölster, H. 1997. Dynamic of soil chemical parameters in shifting agriculture in the Eastern Amazon. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **66**:153-163.
- INE. 2004. *Sistema de Información Hidrológica para el Diseño de un Programa de Pago por Servicios Ambientales*. INE. México.
- INEGI. 2004. *Síntesis de información geográfica del estado de Oaxaca*. INEGI, México.
- ISP. 1994. *Manual de Procedimientos analíticos de suelos y plantas del laboratorio de Fertilidad de Suelos*. Colegio de Postgraduados-Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. México.
- Johnson, C.M., Vieira, I.C.G., Zarin, D.J., Frizano, J. y Johnson, A.H. 2001. Carbon and nutrient storage in primary and secondary forest in Eastern Amazônia. *Forest Ecology and Management* **147**: 245-252.
- Johnston, C. T., Tombácz, E. 2002. Surface Chemistry of Soil Minerals. En: Amonette, J. E., Blears, W. F., Schulze, D. G., Dixon, J. B. 2002. *Soil Mineralogy with Environmental Applications*. Soil Science of America. EUA.
- Juo, A.S. y Manu, A. 1996. Chemical dynamics in slash-and-burn agricultura. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **58**: 49-60.
- Ketterings, Q.M., Van Noordwijk, M. y Bighman, J.M. 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.

- Khormali, K. Ajami, M., Ayoubi, S., Srinivasarao, C. y Wani, S.P. 2009. Role of deforestation and hillslope position on soil qualities attributes of loess-derived soils in Golestan province, Iran. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **134**: 178-189.
- Koonce, A.L. y González-Cabán, A. 1990. Social and ecological aspects of fire in Central America. En: Goldammer, J.G. (Ed). *Fire in the tropical biota: Ecosystem processes and global challenges*. SpringerVerlag. Berlin.
- Lindell, L., Aström, M. y Öberg, T. 2010. Land-use versus natural controls on soil fertility in the Subandean Amazon, Peru. *Science of the Total Environment* **408**: 963-975.
- Malner, A. 1996. Hydrological effects and nutrient losses of forest plantation establishment of tropical rainforest land in Sabah, Malaysia. *Journal of Hydrology* **174**: 129-148.
- Márques, D.M. 1988. *Probabilidad y estadística*. FES Zaragoza. UNAM.
- Mendoza-Vega, J., Karlton, E. y Olsson, M. 2005. Evaluations of amounts of soil organic carbon and fine root carbon in land use and land cover classes, and soil types of Chiapas highlands, México. *Forest Ecology and Management* **17**: 191-206.
- Morfin-Rios, J.E., Jardel.Peláez,E.J., Pérez-Salicrup, D., Alvarado, E., Michael, F.J.M., Castillo-Navarro, F., Vargas-Jaramillo, S. y Cuevas-Guzmán, R. 2010. *Regímenes de incendios y manejo del fuego en ecosistemas forestales de México*. Memorias del XVIII Congreso Mexicano de Botánica. México
- Muñoz, P.C., Guevara, A., Torres, J.M y Braña, J. 2009. Paying for the hydrological services of Mexico's forests: Analysis, negotiations and results. *Economical Economics* **65**: 725-736.
- Nakagawa, T. e Ishiguro, M. 1994. Hydraulic Conductivity of an allophanic Andisol as affected by solution pH. *Journal of Environmental Quality* **23**: 208-210.
- Ortiz, P.M., Hernández, S.J. y Figueroa, M.J. 2004. Reconocimiento fisiográfico y geomorfológico. En: García, M. A., Ordoñez, M. J., Briones, S. M. Eds. *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología-UNAM-FOCN-WWF. México.
- Pagliali, M. y Kutilek, M. 2008. Soil micromorphology and Soil Hydraulics. En:Kapur, S., Stoops, G. y Mermut, A. *New Trends in Soil Micromorphology*. Springer. Alemania.



- Pagliali, M. y Kutilek, M. 2008. Soil Micromorphology and Soil Hydraulics. En: Kapur, S., Mermut, A. y Stoops. 2008. *New Trends in Soil Micromorphology*. Springer. Alemania.
- Pagliani, M., La Marca, M. y Lucamante, G. 1987. Changes in soil porosity in remolded soils treated with poultry manure. *Soil Science* **144**: 124-140.
- Palm, C.A., Vosti, S.A., Sanchez, P.A., Enacsen, P.J. y Stephen, A.V. 2005. *Slash and burn agriculture: the search of alternatives*. Columbia University. New York.
- Pennington, T.D., y Sarukhán, K.J. 2005. *Árboles Tropicales de México, Manual para la Identificación de las Principales Especies*. 3ª ed. UNAM-FCE.
- Pérez, G., C.A. 2005. Modificaciones en las propiedades físicas y químicas del suelo en dos áreas con incendios forestales recientes: La Malinche y El Pelado. Tesis de Licenciatura. *Facultad de Filosofía y Letras*. UNAM. México.
- Pérez, V.A. y Ortiz, P., M.A. 2002. Cambio de la cubierta vegetal y vulnerabilidad a la inundación en el curso bajo del río Papaloapan, Veracruz. *Investigaciones Geográficas* **48**: 90-105.
- Pires, L.F., Cooper, M., Cássaro, F.A.M., Reichardt, K., Bacchi, O.O.S. y Dias, N.M.P. 2007. Mycromorphologic analysis to characterize modifications of soil samples submitted to wetting and drying cycles. *Catena* **72**: 297-304.
- PNUMA. 2000. *Comité Técnico Interagencial de Foro de Ministros de Medio Ambiente de América latina y Caribe*. Conservación y aprovechamiento sustentable de los bosques tropicales húmedos de América Latina y el Caribe. Barbados.
- Poblano, O. J.A., Ángeles, C. E.R., Mendoza, R.N., Sevilla, S.A. y Vásquez, S.G. 2009. *Estimación de la conductividad hidráulica de suelos en una selva alta perennifolia de la region Lacandona, Chiapas*. Memorias del VII Congreso Nacional de Áreas Nacionales Protegidas. México.
- Pritchett, W. 1990. *Suelos forestales: Propiedades, conservación y mejoramiento*. Limusa. México.
- Rab, M.A. 1996. Soil physical and hydrological properties following logging and slash burning in the *Eucalyptus regnans* forest of Southern Australia. *Forest Ecology and Managment* **84**: 159-176.

- Ramírez, T.M.R., Pérez, G.B. y Orozco, S.A.D. 2007. Helechos invasores y su sucesión secundaria post-fuego. *Ciencias*. **85**: 18-25.
- Reatto, A., Bruand, A., Silva, E.M., Martins, E.S., y Brossard M. 2007. Hydraulic properties of the diagnostic horizon of Latosol of a regional toposequence across the Brazilian Central Plateau. *Geoderma* **139**:51-59.
- Reynolds, W.D. y Elrick, D.E. 1985. In situ measurements of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the  $\alpha$ -parameter using the Guelph permeameter. *Soil Science* **140**: 299-302.
- Robichaud, P.R. 2000. Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountain forests, USA. *Journal of Hydrology* **231**: 220-229.
- Rodenburg, J. Stein, A., van Noordwijk, M. y Ketterings, Q.M. 2003. Spatial variability of soil pH and phosphorus in relation to soil run-off slash-and-burn land clearing in Sumatra, Indonesia. *Soil & Tillage* **71**:1-14.
- Rodríguez, T.D.A. 2008. Fires Regimes, Fire Ecology, and Fire Management in Mexico. *Ambio*. **37**: 548-556.
- Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. Limusa. México.
- Sahoo, A.K., Houser, P.R., Ferguson, C., Wood, E.F., Dirmeyer, P.A. y Kafatos, M. 2008. Evaluation of AMSR-E soil moisture results using the in-situ data over the Little River Experimental Watershed Georgia. *Remote Sensing of Environment* **112**:3124-3152.
- Sander, H. 2002. The porosity of tropical soils and implications for geomorphological and pedogenetic processes, the movement on solutions within the weathering cover. *Catena* **49**: 129-137.
- Sarukhán, J. 1964. Estudio sucesional de un área talada en Tuxtepec, Oaxaca (Sucesion study of a forest cut area in Tuxtepec, Oax.) Publicación Especial: *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales*. **3**: 107-172.
- Sarukhán, J. 2010. *Las zonas más pobres, las más ricas en biodiversidad*. GACETA, 19 de agosto de 2010. Aline Juárez

- Schoeneberger, P.J. Wysocki, D.A., Benham, E.C. y Broderson, W.C. 2002. *Field book for describing and sampling soils*. Version 2.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- SEGOB. 2002. *Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal*. Sistema Nacional de Información Municipal. México.
- SEGOB. 2009. *Tercer Informe de Gobierno: Desarrollo Sostenible: Bosques y Selvas*. SEGOB. México.
- SEMARNAT. 2000. *Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, Que establece las especificaciones de la fertilidad, salinidad y clasificación de suelos: Estudios, muestreos y análisis*. SEMARNAT. México.
- SEMARNAT. 2005. *Acuerdo por el que se dan a conocer los resultados de los estudios técnicos para la supresión de veda de aguas superficiales y para la expedición del Reglamento de Control de la explotación, uso o aprovechamiento en doce cuencas*. SEMARNAT. México
- SEMARNAT. 2005a. *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales*. SEMARNAT. México.
- Snook, L.K. 1993. *Stand dynamics of mahogany (Swietenia macrophylla King) and associated species after fire and hurricane in the tropical forests of the Yucatan Peninsula, Mexico. Ph.D. dissertation*. Yale University School of Forestry & Environmental Studies, New Haven, CT, EUA.
- Soto, B., Basanta, R. Perez, R. y Díaz-Fierros, F. 1995. An experimental study of the influence of traditional slash-and-burn practices on soil erosion. *Catena* **24**: 13-23.
- Sousa, S.M. 1964. Estudio de la vegetación secundaria en la región de Tuxtepec, Oaxaca. En: Contribuciones al estudio ecológico de las zonas cálido-húmedas de México. Publicación Especial: *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales*. **3**: 91-105.
- Torres, C.R. 2004. Tipos de Vegetación. En: García, M. A., Ordoñez, M. J., Briones, S. M. Eds. *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología-UNAM-FOCN-WWF. México.
- Trejo, C.M. 2009. Inventario de anfibios en las localidades de San Mateo Yetla y Cerro Marín, Oaxaca. *Tesis de licenciatura*. FES Iztacala-UNAM. México.

- Trejo, I. 2004. Climas. En: García, M. A., Ordoñez, M. J., Briones, S. M. Eds. *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología-UNAM-FOCN-WWF. México.
- Vera, M., Sierra, M., Díaz, M., Sierra, C., Martínez, A., Martínez F.J. y Aguilar J. 2007. Deforestation and land use effects on micromorphological and fertility changes in acidic rainforest soil in Venezuelan Andes. *Soil & Tillage Research* **84**:184-194.
- WRB. 2007. *Base referencial mundial del recurso suelo, un marco conceptual para clasificación y comunicación internacional*. IUSS-ISRIC-FAO. Italia.
- Yemefack, M., Rossiter, D.G., Jetten, V.C. 2006. Empirical modeling of soil dynamics along a chronosequence of shifting cultivation in southern Cameroon. *Geoderma* **133**: 380-397.
- Zar, J.H. 1999. *Biostatistical Analysis*. Cuarta Edición. Prentice Hall. EUA.
- Ziegler, A.D., Giambelluca, T.W., Tran, L.T., Vana, T.V., Nullet, M.A., Fox, J., Vien, T.D., Pinthong, J., Maxwell, J.F. y Evett, S. 2004. Hydrological consequences of landscape fragmentation in mountainous northern Vietnam: evidence of accelerated overland flow generation. *Science of Hydrology* **287**: 124-146.
- Ziegler, A.D., Negishi, J.N., Sidle, R.C. Noguchi, S. y Rahim, N.A. 2006. Impacts of logging disturbance on hillslope saturated hydraulic conductivity in a tropical forest in Peninsular Malaysia. *Catena* **67**:89-104.
- Zimmermann, B., Elsenbeer, H. y De Moraes, J.M. 2006. The influence of land-use on soil hydraulic properties, implications for runoff regeneration. *Forest Ecology and Management* **222**: 29-38.
- Zimmermann, B., Papritz, A. y Elsenbeer, H. 2010. Asymmetric response to disturbance and recovery: Changes of soil permeability under forest-pasture transitions. *Geoderma* **159**:209-215.