



# El Colegio de la Frontera Sur

Efecto del manejo forestal en el contenido de carbono en vegetación y suelo de  
acahuales de Calakmul, México.

TESIS  
presentada como requisito parcial para optar al grado de  
Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural  
por

Andrea Venegas Sandoval

2013

## **AGRADECIMIENTOS**

A El Colegio de la Frontera Sur y a mi tutor, asesores, maestros, compañeros y amigos por permitirme conocer una perspectiva más amplia y compartir experiencias invaluableles.

Agradezco a mi tutor el Dr. Jorge Mendoza Vega, por dirigir este proyecto, gracias por su apoyo, paciencia, enseñanzas y dirección durante la elaboración de esta investigación. A mis asesores agradezco sus enseñanzas, ideas, observaciones y aportaciones, así como por la información proporcionada para mejorar el trabajo. A mi maestra Arisbe Mendoza a quien agradezco su amistad y apoyo.

Al Laboratorio de Suelos (Unidad San Cristóbal) de El Colegio de la Frontera Sur, en especial a Miguel Ángel López Anaya y a Manuel Gutiérrez por el apoyo en el procesamiento de las muestras de laboratorio.

Agradezco a la Asociación Regional de Silvicultores de Calakmul por todo el apoyo dado, en especial al Ing. Juan Manuel Herrera Gloria por las facilidades brindadas, Marcos René Bacab y a Manuel Arana por el apoyo en campo, y a los productores de las parcelas evaluadas. Admiro el trabajo que realizan.

Al Consejo Nacional de la Ciencia y la Tecnología (CONACYT), por el apoyo con la beca otorgada para poder realizar los estudios de maestría.

A mis amigos y compañeros de maestría, gracias por compartir esta experiencia de vida y permitirme aprender y crecer junto con ustedes. En especial gracias Montse, Lalo y Carlos.

## **DEDICATORIA**

A mi familia gracias por todo el apoyo brindado, los admiro y los quiero mucho.

## INDICE

• <b>Capítulo I</b>	
Introducción.....	5
Justificación.....	13
Objetivos.....	14
Hipótesis.....	14
• <b>Capítulo II</b>	
Resumen.....	15
Introducción.....	17
Materiales y métodos.....	19
Resultados.....	23
Discusión.....	25
Conclusión.....	27
Agradecimientos.....	28
Referencias.....	29
Anexos.....	33
• <b>Capítulo III.....</b>	<b>39</b>
• <b>Aspectos éticos en la investigación.....</b>	<b>42</b>
• <b>Literatura citada.....</b>	<b>47</b>

## CAPITULO I

### INTRODUCCIÓN

La transformación de bosques a tierras agrícolas, pastizales y áreas urbanas, así como el cambio climático son problemas ambientales con repercusiones sociales de gran relevancia. Ambos problemas están relacionados; por un lado el cambio de uso de suelo ocasiona: la alteración del ciclo del carbono y modificación del clima global, entre otras consecuencias (Foley *et al*, 2005); y el cambio climático tiene efectos sobre la calidad de tierras productivas lo que puede repercutir en la calidad del sitio para el aprovechamiento agrícola o pecuario (Ojima *et al*, 2001).

El cambio climático ha sido ocasionado por el aumento en la atmósfera de gases de efecto invernadero (GEI) principalmente derivados de la quema de combustibles fósiles y del cambio uso de suelo (IPCC, 2001). La transformación del uso de suelo hacia cubiertas no forestales produce emisiones de carbono resultado de la combustión y descomposición de la biomasa vegetal removida de los bosques, así como de la pérdida de carbono orgánico de los suelos. Se calcula que se liberan a la atmósfera aproximadamente  $1.6 \pm 0.4$  Pg de C (1 PgC= 1GtC=  $10^{15}$  g de carbono) por año resultado del cambio de uso de suelo en latitudes bajas (Dixon *et al*, 1994). El aumento del CO<sub>2</sub> y de otros GEI generan variaciones en la temperatura las cuales tienen efecto sobre el funcionamiento de los ecosistemas (Ojima *et al* 2001).

Las principales reservas del carbono orgánico las constituyen: océanos (38,000 PgC: Petagramo de Carbono), suelos (1,500 PgC) y vegetación (500 PgC) (Malhi, 2002). Cada año 120 PgC son transferidos de la atmósfera a la vegetación por medio de la fotosíntesis, de los cuales 60 PgC regresan a la atmósfera a través de la

respiración. Sin embargo el carbono remanente en la vegetación eventualmente se transfiere al suelo como materia orgánica, y una pequeña fracción es ingerida por los herbívoros y otros animales que a su vez liberan el carbono mediante el metabolismo animal. A estos cambios en donde el carbono circula en el ecosistema y provoca cambios dentro y fuera del suelo es denominado “Ciclo del carbono” (Malhi, 2002).

Un aspecto clave en la dinámica del carbono en el suelo es la relación existente entre la estructura y la estabilización de la materia orgánica del suelo (MOS) (Six *et al*, 2002). La MO está asociada a la textura del suelo, los minerales arcillosos, óxidos y carbonatos; y el grado en el que se presenta esta asociación controla la descomposición de MOS (Shang & Tiessen, 2003). Existen tres mecanismos principales para la estabilización de la MOS: estabilización química, protección física y estabilización bioquímica: a) la estabilización química es el resultado de la interacción entre las propiedades químicas o fisicoquímicas de la materia orgánica y los minerales del suelo (partículas de limo y arcilla); b) la protección física consiste en la influencia de la agregación del suelo en la acumulación de la materia orgánica. Los agregados constituyen barreras físicas entre los microorganismos y enzimas y sus substratos; c) estabilización bioquímica es entendida como la estabilización por la composición química a través de procesos biológicos complejos en el suelo. Los altos niveles de humedad y temperatura en las regiones subtropicales inducen una tasa de descomposición rápida por lo que a su vez estas condiciones contribuyen a una baja estabilización de carbono en el suelo (Six *et al*, 2002).

Los bosques tropicales cubren cerca del 42% del área forestal del planeta y contienen aproximadamente el 25% del carbono de la biosfera terrestre. Más de la mitad de los estos bosques se localizan en América (Dixon *et al*, 1994; Parker *et al*,

2009). El potencial de mitigación en este sector se explica mediante los siguientes tres argumentos enunciados por Brown *et al*, (2002), Dixon *et al* (1994) y Bass *et al*, (2000):

a) Conservación del almacén de carbono, a través de la prevención o reducción de la tasa de liberación del carbono que se encuentra en vegetación y en suelos.

b) Secuestro de carbono, mediante el incremento de la tasa de acumulación de carbono por medio del aumento del área y densidad de bosques; las prácticas de silvicultura y agroforestería pueden contribuir en el secuestro de carbono.

c) Substitución de carbono que involucra el uso sustentable de madera para la construcción y como fuente de combustible en remplazo de combustibles fósiles.

Por lo anterior los ecosistemas forestales son importantes componentes del ciclo global del carbono y juegan una importante tarea en la reducción de emisiones GEI sin embargo, el potencial de captura y conservación de carbono en el sector depende del aprovechamiento que se le dé a los recursos forestales y de los beneficios que obtenga la población del bosque (Canadell & Raupach, 2008).

La acumulación de carbono en un sistema forestal se debe a diversos factores: la edad, densidad de la población de cada estrato por comunidad vegetal y composición florística, manejo silvícola, condiciones edáficas e historia del uso del suelo y el clima (Soto-Pinto *et al*, 2010; Roncal *et al*, 2008; Lal, 2005; Albrecht & Kandji, 2003). El suelo constituye un importante reservorio de carbono, por lo que es necesario entender cómo influyen las prácticas de manejo forestal en él (Lal, 2005).

Ante escenarios de cambio climático se están dirigiendo las investigaciones actuales hacia estudios que brinden las bases para la construcción de estrategias de adaptación y mitigación. De acuerdo con la Cuarta Comunicación de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático se consideran

entre las acciones de mitigación relacionadas al sector forestal y agrícola, la promoción del incremento del potencial de los sumideros forestales de carbono, estabilización de la frontera forestal-agropecuaria, y la disminución de incendios forestales (SEMARNAT, 2009). Asimismo en el Programa Especial de Cambio Climático (documento en el que se plasman las estrategias de adaptación y los compromisos de mitigación de México), la mitigación en el sector forestal está enfocada principalmente a la incorporación de aproximadamente tres millones de hectáreas al manejo forestal sustentable (SEMARNAT, 2009). El manejo forestal puede ser definido como la actividad que incluye la manipulación de la estructura del bosque, composición florística y densidad de las especies presentes (De Jong & Ruíz-Díaz, 1997). En la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable se define como silvicultura: “La teoría y práctica de controlar el establecimiento, composición, constitución, crecimiento y desarrollo de los ecosistemas forestales para la continua producción de bienes y servicios”.

En algunas regiones de México se han desarrollado estrategias para la mitigación de GEI por medio de programas de pago por servicios ecosistémicos (PSE). La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) desarrolla un programa nacional de servicios ambientales para apoyar actividades de conservación de la biodiversidad, sistemas agroforestales, servicios hidrológicos y captura de carbono en zonas prioritarias con fondos públicos. Otras iniciativas mantienen proyectos de PSE, sustentados por mercados voluntarios.

El esquema de conservación de silvicultura comunitaria inició en la región de la Península de Yucatán con el Plan Piloto Forestal en Quintana Roo a principios de la década de los ochenta. La estrategia histórica de aprovechamiento de los recursos

forestales en Calakmul se ha basado en el uso múltiple del recurso tanto de los maderables como de los no maderables, es decir se busca diversificar las opciones de aprovechamiento, valorando los diferentes productos (pimienta, chicle, miel, maderables, etc) (Acopa & Boege, 1999; Kepleis, 2004). Ejemplo de las estrategias productivas diversificadas realizadas en Calakmul son los sistemas agroforestales (Acopa & Boege, 1999). Los sistemas agroforestales son aquellos sistemas productivos en donde existe una asociación de especies leñosas perennes, ya sean árboles, arbustos, palmas, con cultivos agrícolas o animales. Estas combinaciones de especies pueden existir en la misma parcela al mismo tiempo, o en rotaciones temporales (Nair, 1993; Albrecht & Kandji, 2003; Soto-Pinto *et al*, 2008).

Actualmente 27 ejidos de la región participan en el manejo forestal comunitario organizados mediante la Asociación Regional de Silvicultores (ARS) Productores Forestales de Calakmul A.C. Los principales objetivos de la ARS consisten en: disminuir la tasa de deforestación a través del manejo forestal, invertir recursos en el manejo forestal comunitario de la UMAFOR 0404 Calakmul y desarrollar alternativas económicas para el beneficio de los ejidos asociados, a través de las siguientes actividades:

**Prácticas de aclareos en acahuales.** Los aclareos propuestos consisten en retirar del 60 al 70% de la cobertura forestal y dejar crecer alrededor de 1500 individuos por hectárea en rodales que se encuentran en etapas iniciales de desarrollo. Se retiran: árboles deformados, muertos en pie, suprimidos y/o algunas de las especies arbóreas que no tienen valor comercial. La finalidad de los aclareos es reducir las posibilidades de incendios, disminuir la competencia, permitir el paso de la luz que a la vez favorezca el crecimiento de especies vegetales con valor comercial, aumentar la producción total

de madera, y por lo tanto incrementar el valor económico del acahual (Guariguata, 1999; Schroeder, 1991; Vargas *et al*, 2009). El número de aclareos que tenga el acahual depende de las actividades que el ejidatario realice en su parcela, y de los apoyos económicos que reciba por instituciones como la CONAFOR.

**Programa de agroforestería con enriquecimiento forestal escalonado:**

Consiste en organizar por ciclos el aprovechamiento diversificado de los recursos de una parcela. Durante el primer año se realiza milpa y se siembran frutales y forestales. (Acopa & Boege, 1999).

**Plantaciones forestales comerciales bajo dosel** (acahuales mejorados). Esta práctica consiste en el enriquecimiento de acahuales de entre 10 y 15 años con especies nativas de rápido crecimiento: Ramón (*Brosimum alicastrum*), Chicozapote (*Manilkara zapota*), Palma Xiat (*Chamaedorea oblongata*) y Pimienta (*Pimenta dioica*). El enriquecimiento de los acahuales con pimienta consiste en la siembra entre 100 y 260 árboles por hectárea (Eccardi, 2008). Los acahuales mejorados son considerados como un sistema agroforestal intermedio entre la agricultura migratoria y la agricultura sedentaria (Kass, 1998; Tschakert *et al*, 2007). El mejoramiento ocurre con la finalidad de incrementar el valor económico del bosque por medio del aprovechamiento de productos forestales (frutales y maderables) y por la capacidad de algunas plantas de mejorar la fertilidad del suelo o disminuir el crecimiento de arvenses (Kass, 1998; Soto-Pinto *et al*, 2008). Roncal y colaboradores en el 2008 mencionan que un acahual mejorado de siete años presenta  $150.1 \pm 43.3 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$  de carbono total en el sistema.

**Producción de carbón vegetal.** Esta es una práctica que se realiza aprovechando los árboles caídos y la vegetación que se retira del acahual durante el

aclareo. Actualmente en la comunidad de Zoh Laguna la mayoría de los ejidatarios que producen carbón vegetal están organizados en una Sociedad de carboneros.

**Áreas con PSE con implementación de actividades productivas comunitarias:** Se realizan las siguientes prácticas en las áreas con pagos por servicios ecosistémicos: apicultura, colecta de semillas para la producción de plantas de ornato y producción de chicle.

**Viveros comunitarios.** Están orientados a la producción de especies nativas con la finalidad de dar abasto de plantas para los proyectos de plantaciones forestales comerciales.

Las prácticas de manejo forestal modifican la vegetación por lo que puede tener efectos en el carbón almacenado en el sistema, tanto en suelo como en la biomasa arriba del suelo (Wang *et al*, 2012; Schroeder, 199; Dixon *et al*, 1994). Schroeder (1991) examinó los cambios en el almacenamiento de carbono de un bosque manejado con prácticas de aclareo, fertilización y control de la vegetación de competencia, observó pequeños incrementos en la productividad del bosque como resultado de los aclareos. Las prácticas de manejo forestal (aclareo y mejoramiento) al fomentar y acelerar el crecimiento de árboles con valor comercial, permitirán aprovechar los recursos forestales sin la destrucción del bosque, por lo que se conservará el carbono almacenado en los productos forestales. El manejo de los recursos forestales puede considerarse como un componente de las estrategias de mitigación al cambio climático, además que permite la generación de ingresos por el aprovechamiento de la materia que es cosechada en cada aclareo. En este sentido la ARS está elaborando una “Propuesta de adaptación y mitigación a los efectos del cambio climático con enfoque hacia la silvicultura comunitaria” para la región de Calakmul.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La capacidad de fijación de carbono a través de los procesos bióticos por los ecosistemas forestales se ve influenciada por diferentes condiciones, entre las que se encuentran: la composición florística, edad, densidad de la población de cada estrato por comunidad vegetal, manejo silvícola, clima, características del suelo como textura, tipos de minerales arcillosos, agregación, densidad aparente y la historia de uso de suelo (Soto-Pinto *et al*, 2010; Albrecht & Kandji, 2003; Six *et al*, 2002; Lal, 2005).

En Valentín Gómez Farías (VGF) y Zoh Laguna, Calakmul se están implementando acciones de manejo forestal que consisten en enriquecer los acahuales con especies arbóreas nativas de valor comercial y en la realización de aclareos. Estas actividades modifican la composición, estructura florística, densidad, crecimiento y área basal del acahual, por lo tanto la cantidad de carbono que pueden capturar en comparación con un acahual natural (sin intervención). Por esta razón resulta pertinente realizar investigaciones que consideren el impacto positivo y negativo de las actividades productivas en la captura de carbono (Kotto-Same *et al*, 1997). Los resultados de estas investigaciones deben ser integrados con el conocimiento y las innovaciones de los usuarios rurales de los recursos naturales para garantizar la conservación de los recursos (Chazdon *et al*. 2008; Cairns & Garrity, 1999). Sin embargo, son escasos los estudios que evalúan el manejo, estructura y función de los acahuales, especialmente donde se maneja una alta diversidad de especies. Por lo que el principal objetivo de la presente investigación consistió en evaluar el efecto del manejo de los acahuales (aclareo y enriquecimiento) que se practica en VGF y en Zoh Laguna sobre los reservorios de carbono para identificar en estos ejidos, como caso de estudio, qué

prácticas productivas pueden ser utilizadas para contribuir como medidas de mitigación y adaptación ante el cambio climático.

#### PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo influye el manejo de acahuales (aclareo y enriquecimiento) en el contenido de carbono en la vegetación y en el suelo?

#### JUSTIFICACIÓN

Es necesario buscar acciones reales encaminadas a la conservación de los bosques y mitigación de emisiones de GEI por medio del aprovechamiento sustentable de los recursos, ya que por medio de algunas prácticas de manejo de suelo y de los recursos forestales se puede contribuir a la captura de carbono. Estudios como el realizado por Bray y colaboradores (2008) han demostrado que las áreas que están bajo manejo forestal comunitario presentan menos deforestación que aquellas que son áreas protegidas formales. La población de la región de Calakmul, Campeche se ha organizado mediante la ARS Calakmul y han diseñado estrategias para el manejo de sus recursos, en especial los forestales. Sin embargo la ARS enfrenta algunos retos que consisten en fortalecer la organización ejidal, establecer parcelas permanentes para la evaluación de la dinámica forestal y validar las prácticas de manejo forestal. En este sentido resulta necesario realizar investigaciones que estudien las actividades de conservación y de manejo de los recursos naturales dentro de la comunidad (Chazdon *et al*, 2008). Estudiar la estructura y la capacidad de almacenamiento de carbono en los acahuales manejados en VGF y Zoh Laguna permitirá el establecimiento de estrategias de mitigación y adaptación de GEI en esta región, pero también poder hacer inferencias

de cómo las formas de manejo pueden influir en el aceleramiento de la producción de biomasa vegetal y la captura de carbono en áreas tropicales.

#### OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de las prácticas de manejo de aclareo y enriquecimiento de acahuales (barbechos) en los ejidos Valentín Gómez Farías y Zoh Laguna en el contenido de carbono en la vegetación y en el suelo.

#### OBJETIVOS PARTICULARES

- Estimar y comparar la cantidad de carbono almacenado en los reservorios de: biomasa (árboles adultos, árboles juveniles, herbáceas y raíces), materia orgánica muerta (árboles, ramas caídas y hojarasca) y en el suelo entre acahuales con diferentes tipos de manejo (mejoramiento (barbecho) y aclareo) y acahuales naturales.
- Comparar el efecto de las prácticas de manejo de acahuales sobre la diversidad de especies arbóreas entre acahuales con diferentes tipos de manejo y acahuales sin intervención.

#### HIPÓTESIS

El manejo de acahuales aumenta la captura de carbono en comparación a los acahuales naturales; debido a que las prácticas de manejo forestal modifican la vegetación por lo que puede tener efectos en el carbono almacenado en el sistema (tanto en suelo como en biomasa) (Schroeder, 1991)

#### **CAPITULO II**

**(Artículo sometido a la Revista de Biología Tropical)**

## “Efecto del manejo forestal en el contenido de carbono en vegetación y suelo de acahuales de Calakmul, México”

Venegas-Sandoval A.<sup>1</sup>, Mendoza-Vega, J.<sup>1,\*</sup>, de Jong, B.H.J. <sup>1</sup>, Soto-Pinto, L.<sup>2</sup>, Ramos-Hernández S.G. <sup>3</sup>

<sup>1</sup> El Colegio de la Frontera Sur, Av. Rancho Polígono 2A; Parque Industrial Lerma, CP 24500, Campeche, Campeche, México.

<sup>2</sup> El Colegio la Frontera Sur, Carretera Panamericana y Periférico Sur s/n, Barrio María Auxiliadora, CP 29290, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México.

<sup>3</sup> Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Libramiento Norte Poniente s/n, Col. Lajas Maciel, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, C.P. 29039.

Correos electrónicos: [avenegas@ecosur.mx](mailto:avenegas@ecosur.mx); [bjong@ecosur.mx](mailto:bjong@ecosur.mx); [lsoto@ecosur.mx](mailto:lsoto@ecosur.mx); [silviaramosh@gmail.com](mailto:silviaramosh@gmail.com)

\* Autor de correspondencia [jmendoza@ecosur.mx](mailto:jmendoza@ecosur.mx)

### Resumen:

En la presente investigación se evaluó el efecto de las prácticas de manejo forestal bajo silvicultura comunitaria, específicamente el número de aclareos y el enriquecimiento de acahuales (barbechos) con distintas especies forestales en los ejidos Valentín Gómez Farías y Álvaro Obregón, Calakmul, Campeche, sobre reservorios de carbono (biomasa aérea y subterránea, materia orgánica muerta y suelo), así como en la diversidad de especies arbóreas en bosques secundarios (acahuales). Se establecieron 17 parcelas de muestreo en acahuales de 15 años de edad, con las siguientes variaciones de manejo forestal (tratamientos): dos aclareos, tres aclareos, dos aclareos con enriquecimiento de *Pimenta dioica*, sistema agroforestal de *Swietenia macrophylla-Citrus sinensis* y acahuales naturales (sin manejo). Los acahuales estudiados presentaron entre 113.95 y 193.13 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono total, 59% correspondió al carbono orgánico del suelo, 32% a la biomasa (aérea y subterránea) y 9% a la materia orgánica muerta. Se encontró diferencia significativa ( $p < 0.001$ ) en cantidad de biomasa entre tratamientos, no así cuando se comparó el carbono total. Se concluye, que en acahuales de 15 años de edad los aclareos pueden influir en el contenido de carbono en el componente arbóreo, no se identificó efecto del manejo en suelos y materia

orgánica muerta. No se descarta que el manejo tenga influencia en todos los reservorios, lo cual es difícil de identificar en aquellos reservorios que cambian lentamente, como el suelo.

**Palabras clave:** silvicultura comunitaria, aclareos, estrategias de mitigación, carbono orgánico del suelo, biomasa.

**Abstract:**

Secondary forests play an important role in reducing greenhouse gases (GHG), thus representing areas of opportunity to establish strategies for climate change mitigation. In the Yucatan Peninsula, different conservation strategies and forest resources utilization have been implemented, one of which is community Silviculture. It has been reported that community silviculture sites have lower deforestation rates than protected forests. In the present research the effect of forest management practices under community Silviculture, implemented in the Ejidos Valentín Gomez Farias y Alvaro Obregon, Calakmul, Campeche, on carbon reserves (above and below ground biomass, organic matter and soil), as well as on diversity of tree species of secondary forest was evaluated. 17 experimental plots were established in 15 year-secondary forests with different forest management (treatments): two thinning, three thinning, two thinning along with *Pimienta dioica*, agroforestry system with *Swietenia macrophylla-Citrus sinensis* and natural secondary forest (no forest management). The secondary forests under study had between 113.95 and 193.13 Mg ha<sup>-1</sup> of total carbon, of which 59% corresponded to soil organic carbon, 32% to biomass (above and below ground) and 9% to dead organic matter (stems, branches and fallen stumps, dead standing trees and dead woody debris). There was significant ( $p < 0.001$ ) differences in biomass amounts among treatments, but not when comparing total carbon. It is not rejected that management has influence on all reservoirs, something which is difficult to perceive in reservoirs that change slowly, such as the soil.

**Key words:** community silviculture, thinning, mitigation strategies, soil organic carbon, biomass

## 1. Introducción

Los bosques tropicales cubren cerca del 42% del área forestal del planeta de la cual una gran parte corresponde a bosques secundarios, por lo que este tipo de vegetación juega un importante rol en el ciclo del carbono (Dixon *et al.* 1994; Brown y Lugo, 1990; Hughes *et al.* 1999; Vargas *et al.* 2009; Guariguata, 1999). Los bosques secundarios al ser cada vez más abundantes representan áreas de oportunidad para establecer estrategias de mitigación de CO<sub>2</sub>, para lo cual es necesario entender su ecología y manejo.

El potencial de mitigación en el sector forestal se explica mediante tres argumentos: conservación del almacén de carbono a través de la prevención o reducción de la tasa de liberación del carbono; secuestro de carbono producido por el incremento del área y densidad de carbono en los reservorios y sustitución de carbono que involucra el uso sustentable de madera para la construcción así como fuente de combustible en remplazo de combustibles fósiles (Brown *et al.* 2002; Bass *et al.* 2000); sin embargo el potencial de captura y conservación de carbono en el sector depende del manejo que se le dé a los recursos forestales y de los beneficios que obtenga la población del bosque (Canadell y Raupach, 2008). En adición, el manejo sustentable de los recursos forestales tiene un valor ecológico de gran importancia, que es la conservación de la biodiversidad (Fredericksen y Putz, 2003).

Es importante que el conocimiento científico sea integrado con el saber y las innovaciones de los usuarios rurales de los recursos naturales, en este caso los forestales, para garantizar su aprovechamiento sustentable (Chazdon *et al.* 2008; Cairns y Garrity, 1999). Se ha reportado que los sistemas forestales manejados por comunidades presentan menos deforestación anual que los bosques formalmente protegidos (Porter – Bolland *et al.* 2011; Bray *et al.* 2008). Sin embargo, es necesario evaluar los efectos del manejo del bosque en los componentes y procesos del ecosistema. En este sentido, la cantidad de biomasa y carbono acumulados en cierto período de tiempo son buenos indicadores del desarrollo de los bosques (Kotto - Same *et al.* 1997; Saynes *et al.* 2012). Otro aspecto que es importante considerar es el impacto del manejo forestal en la diversidad y composición florística del bosque. Algunos estudios han reportado que la diversidad de especies arbóreas no varía

significativamente entre bosques naturales y bosques manejados (Verbug y van Eijk-Bos, 2003; Vester y Navarro - Martínez, 2007).

La acumulación de carbono en un sistema forestal se debe a diversos factores entre los que destacan: la edad, densidad de la población de cada estrato por comunidad vegetal, composición florística, manejo silvícola, condiciones edáficas, historia del uso del suelo y el clima (Soto-Pinto *et al.* 2010; Lal, 2005; Albrecht y Kandji, 2003). Gamboa *et al.* (2010), encontraron que la cantidad de carbono que pueda secuestrar un ecosistema forestal se encuentra limitada por la cantidad de fósforo y nitrógeno que contenga el suelo.

En los estados que integran la Península de Yucatán (Campeche, Yucatán y Quintana Roo), al sureste de México, se han establecido diferentes estrategias de conservación y aprovechamiento de los recursos forestales. Una de estas, es el esquema de silvicultura comunitaria, que inicio en la región con el Plan Piloto Forestal en el estado de Quintana Roo a principios de la década de los ochenta (Acopa y Boege, 1999). La estrategia histórica de aprovechamiento de los recursos forestales en Calakmul, Campeche, se ha basado en el uso múltiple de los recursos tanto de los maderables como de los no maderables, es decir, los productores buscan diversificar las opciones de aprovechamiento, valorando los diferentes recursos (Acopa y Boege, 1999; Kepleis, 2004). Como parte de la silvicultura comunitaria en Calakmul se constituyó la Asociación Regional de Silvicultores (ARS): Productores Forestales de Calakmul A.C. teniendo como principales objetivos: disminuir la tasa de deforestación bajo el concepto de manejo forestal, fortalecer el sector forestal en la Unidad de Manejo Ambiental Forestal (UMAFOR) 0404 Calakmul y desarrollar alternativas económicas para el beneficio de los ejidos (comunidades rurales) asociados.

Una de las actividades del manejo de acahuals que es promovida por la ARS son los aclareos, los cuales son realizados cada año y consisten en la corta o eliminación manual de árboles deformados y muertos en rodales que se encuentran en etapas iniciales de desarrollo. La finalidad de los aclareos es disminuir la competencia por los recursos como la luz y nutrientes que a la vez favorezca el crecimiento de especies vegetales con valor comercial, aumentar la producción total de madera, y por lo tanto incrementar el valor económico del acahual (Guariguata, 1999; Schroeder, 1991;

Vargas *et al.* 2009). Los aclareos realizados durante el manejo forestal pueden imitar el proceso de aclareos que ocurre en el ecosistema de forma natural, por lo que resulta interesante estudiar los efectos de esta práctica en los reservorios de carbono (Vargas *et al.* 2009).

En el contexto de cambio climático resulta relevante investigar como las diferentes prácticas de manejo forestal afectan el contenido de carbono en ecosistemas forestales. Es pertinente que se realicen este tipo de investigaciones en regiones como la de Calakmul, donde se combina por un lado, la presión antrópica por los recursos para la producción de alimentos y por otro lado el hecho de que en esta región se conserva el macizo forestal tropical más importante de México, por su extensión, lo que representa un significativo almacén de carbono (Urquiza - Hass *et al.* 2007). Los objetivos del presente estudio fueron: Comparar el efecto de las prácticas de manejo de acahuals sobre los reservorios de carbono (biomasa, materia orgánica muerta y suelo) y la diversidad de especies arbóreas entre acahuals con diferentes tipos de manejo y acahuals sin intervención en dos ejidos de Calakmul, México.

## **2. Materiales y Métodos**

### *2.1 Área de estudio*

Este estudio fue realizado en los ejidos Valentín Gómez Farías y Álvaro Obregón (Zoh Laguna) pertenecientes al municipio de Calakmul, 18°30'N y 89° 24'O, Campeche, México. El clima en la zona es cálido subhúmedo, con temperatura media anual de 24.4 °C y una precipitación media anual de 1012 mm. (INEGI, 2011). La vegetación original predominante en el área corresponde a selva mediana subperennifolia (Miranda, 1978). Las especies arbóreas más abundantes en los acahuals estudiados fueron: *Lonchocarpus xuul* Lundel (Xuul amarillo), *Croton glabellus* L. (Cascarillo), *Bursera simarruba* (L.) Sarg. (Chakah rojo). Los suelos predominantes en esta área corresponden a: Leptosoles rendzicos en asociación con Leptosoles líticos y Vertisoles pélicos, en las partes bajas se presentan Gleysoles vérticos (INEGI, 1985).

### *2.2 Diseño de muestreo*

Se seleccionaron terrenos de productores asociados a la ARS, en donde se establecieron 17 parcelas circulares concéntricas en acahuales de 15 años con diferentes estrategias de manejo forestal (tratamientos): tres parcelas en acahuales con dos aclareos; tres parcelas en acahuales con dos aclareos y con prácticas de enriquecimiento con *Pimenta dioica* (L.) Merr.; tres parcelas en acahuales con tres aclareos; tres parcelas en acahuales con sistema agroforestal de *Swietenia macrophylla* King y *Citrus sinensis* (L.) Osbeck; y cinco parcelas en acahuales naturales (sin manejo forestal). La edad de los acahuales fue obtenida por entrevistas a los ejidatarios dueños de las parcelas. Las parcelas de muestreo fueron ubicadas en sitios que presentaron condiciones geomorfológicas similares, tales como geología, tipo de suelo, orientación y pendiente. En cada parcela se marcaron dos círculos concéntricos (1000 m<sup>2</sup> y 400 m<sup>2</sup>) y cuatro cuadrantes de 1 m<sup>2</sup> (Fig. 1), en las que se cuantificó biomasa y carbono orgánico en cada reservorio (biomasa aérea y subterránea, materia orgánica muerta y suelo). El diseño de las parcelas fue adaptado del establecido por el Programa Mexicano del Carbono.

### 2.3 Procedimiento en campo y determinación de carbono.

#### 2.3.1 Biomasa.

##### 2.3.1.1 Biomasa arriba del suelo:

2.3.1.1.1 *Árboles adultos*: En la parcela de 1000 m<sup>2</sup> se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP a 1.30 m) de todos los árboles con diámetro mayor o igual a 0.1m (Rendón y Soto-Pinto, 2007; Pearson *et al.* 2005). Para estimar la biomasa se utilizó la fórmula citada por Urquiza-Haas *et al.* (2007) para la Península de Yucatán (Tabla 1). La altura de cada árbol fue determinada por medio de una regresión logarítmica que fue elaborada considerando el DAP y la altura de 40 árboles medidos en diferentes parcelas (Tabla 1). Para la densidad de la madera se utilizaron valores conocidos de las principales especies tropicales (Tamarit y López, 2007, Tamarit y Fuentes, 2003), mientras que para las desconocidas, se utilizó el promedio de las densidades con base a Rendón y Soto-Pinto (2007).

2.3.1.1.2 *Árboles juveniles*: En la parcela de 400 m<sup>2</sup> se midió el DAP de los árboles que tuvieran más de 0.0248 m de diámetro. Para estimar la biomasa se utilizó la fórmula de Hughes *et al* 1999 (Tabla 1).

2.3.1.1.3 *Herbáceas*: Se colectaron las herbáceas encontradas en los cuatro cuadros de 1m<sup>2</sup>, se pesó el total de la biomasa herbácea colectada en cada cuadro de muestreo y posteriormente se mezclaron para formar una submuestra (200-500 g) para su análisis en laboratorio (Programa Mexicano del Carbono, 2011). Para obtener el C total de las herbáceas se utilizó el peso en fresco y seco (secadas a temperatura de 65°C) de las muestras y la concentración de C obtenido en laboratorio (determinado con el método Walkley y Black).

#### 2.3.1.2 *Biomasa abajo del suelo*:

2.3.1.2.1 *Raíces*: Se realizó una estimación del carbono contenido en raíces por medio de la ecuación propuesta por Cairns y colaboradores (1997) (Tabla 1).

#### 2.3.2 *Materia orgánica muerta*:

2.3.2.1. *Ramas caídas*: Se registró el diámetro de las ramas caídas que se encontraron en la intersección de cuatro líneas de 25 m de largo y se clasificaron de acuerdo a su estado de descomposición. Se calculó el carbono considerando: la densidad de la madera por estado de descomposición (determinada en laboratorio por el método de desplazamiento de agua), contenido de carbono por estado de descomposición (E. Orihuela, en prep.) y el volumen calculado utilizando la fórmula propuesta por Wagner (1968) (Tabla 1).

2.3.2.2. *Árboles muertos en pie*: Se midió el DAP y la altura de los árboles muertos que se encontraban en la parcela 1000 m<sup>2</sup>. Se calculó con las ecuaciones utilizadas para la determinación de biomasa, para árboles adultos (Urquiza – Hass *et al.* 2007) y para árboles jóvenes (Hughes *et al.* 1999) (Tabla 1).

2.3.2.3. *Tocones*: se midió el diámetro y altura de los tocones localizados en la parcela de 1000 m<sup>2</sup>. Se calculó el carbono considerando: la densidad de la madera por estado de descomposición, contenido de carbono por estado de descomposición (E. Orihuela, en prep.) y el volumen calculado con la fórmula del cilindro (Tabla 1) (Programa Mexicano del Carbono, 2011).

2.3.2.4. *Hojarasca y humus*: En cada uno de los cuatro cuadros de 1 m<sup>2</sup> se retiraron las capas de hojarasca y humus, se pesaron en campo y se formó una submuestra compuesta para el análisis de laboratorio (Programa Mexicano del Carbono, 2011). Para obtener el C total de la hojarasca y humus se utilizó el peso en

fresco y seco (secadas a temperatura de 65°C) de las muestras y la concentración de C obtenido en laboratorio (determinado con el método Walkley y Black) (Burton y Pregitzer, 2008).

2.3.2.5. *Carbono orgánico del suelo (COS) y propiedades del suelo:* En los cuadros 1 m<sup>2</sup>, se tomó una muestra de suelo en cada una de las tres profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm o hasta donde la profundidad del suelo lo permitió) utilizando cilindros de 5 cm de diámetro y 5 o 10 cm de largo (dependiendo las condiciones de profundidad y pedregosidad del suelo) para la determinación de la densidad aparente. En los mismos cuadrantes se insertó una varilla graduada para medir la profundidad del suelo y con una pala se tomó una muestra de suelo por profundidad (0-10, 10-20 y 20-30 cm o hasta donde la profundidad del suelo lo permitió), se formaron muestras compuestas por profundidad y se realizaron los siguientes análisis de suelo de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000: carbono orgánico (Walkley y Black, (oxidación por dicromato de potasio), nitrógeno total (Semi-Microkjeldhal), fósforo extraíble (Olsen), carbonato de calcio (neutralización ácida), pH relación (1:2 H<sub>2</sub>O), capacidad de intercambio catiónico (CIC) (acetato de amonio 1N pH 7) y textura (Bouyoucos). Utilizando el suelo obtenido mediante los cilindros de volumen conocido se determinó la densidad aparente del suelo; además se consideró la profundidad efectiva del suelo, el contenido de carbono, con lo que se determinó el contenido de carbono orgánico por profundidad, hectárea y tratamiento.

#### 2.4. *Diversidad de especies arbóreas*

La identificación de especies arbóreas se realizó con base al listado de Sosa *et al.* (1985) y de Durán *et al.* (2000). Posteriormente, se determinó la riqueza de especies y el Índice de diversidad de Shannon - Wiener (Moreno, 2001):

$$H' = - \sum p_i \ln p_i.$$

Dónde:  $p_i$  = abundancia proporcional de la especie  $i$  (número de individuos de la especie  $i$  dividido entre el número total de individuos de la muestra)

#### 2.5. *Análisis estadístico*

Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de medias entre tratamientos con los datos de biomasa, carbono total, propiedades físico-químicas de los suelos y

diversidad de especies para examinar diferencias entre tratamientos. Cuando no se cumplieron los supuestos se realizó un análisis no paramétrico de Kruskal Wallis ( $p < 0.05$ ). Se corrieron análisis de correlación entre biomasa y: nitrógeno total y fósforo. En todos los análisis estadísticos se utilizó el programa Statistica 7.0. StatSoft. Inc. 1984-2004.

### 3. Resultados

#### 3.1. Stocks de carbono

No se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre tratamientos en el contenido de carbono total (Tabla 2), el cual en promedio, se distribuyó de la siguiente manera: carbono orgánico del suelo 59%, biomasa (raíces, herbáceas, arboles adultos y jóvenes) 32%, y materia orgánica muerta (troncos y ramas caídas, hojarasca, árboles muertos en pie y tocones) 9% (Fig. 2).

En contraste, los tratamientos difirieron significativamente en contenido de biomasa. La diferencia se debió principalmente a la mayor cantidad de biomasa ( $\text{Mg C ha}^{-1}$ ) en los tratamientos con tres aclareos sobre *S. macrophylla-Citrus sinensis* y *P. dioica* (Tabla 2). En general se percibe una tendencia a que los aclareos propician un incremento en la biomasa: tres aclareos > dos aclareos > acahuales naturales > *P. dioica* > *S. macrophylla - C. sinensis* (Tabla 2). A pesar de que no hubo diferencias significativas entre tratamientos en el contenido de materia orgánica muerta total, (debido únicamente a la participación de ramas y troncos caídos), si existieron diferencias significativas en el contenido de hojarasca, materia muerta en tocones y árboles muertos en pie (Tabla 2). Por último, el carbono orgánico del suelo no varió significativamente entre tratamientos.

La clase diamétrica en la que se concentran la mayor cantidad de biomasa en todos los tratamientos, fue la de 10 a 20 cm de DAP (Tabla 3).

#### 3.2. Propiedades del suelo y su relación con los tratamientos

Los suelos en todas las parcelas fueron poco profundos, medianamente alcalinos, con un pH de  $7.8 \pm 0.01$  a  $8.1 \pm 0.10$ , franco arcillosos, relativamente fértiles, de valores muy similares entre sí en las propiedades analizadas; capacidad de intercambio catiónico (CIC), nitrógeno total (Nt), carbono orgánico (COS), fósforo (P), textura y densidad

aparente (Tabla 4). Algunas propiedades del suelo difieren entre tratamientos, por ejemplo, el sistema agroforestal de *Swietenia macrophylla-Citrus sinensis*, tuvo un contenido de arcilla y CIC significativamente mayor al resto de los tratamientos, en contraste, el mismo tratamiento tuvo significativamente el menor contenido de COS y N total (Tabla 4). El contenido de fósforo en los suelos de estudio fue medio, entre 6.7 y 10.3 mg/kg y los acahuales naturales tuvieron el contenido significativamente mayor de fósforo entre los tratamientos (Tabla 4). La relación entre el contenido de carbono en la biomasa (C Mg ha<sup>-1</sup>) con el nitrógeno total (%), fue muy baja ( $r^2$ : 0.26,  $p < .05$ ); sólo el 26% del contenido de biomasa se explica por el Nt, mientras que no existió correlación con el fósforo ( $r^2$ : 0.004,  $p > .05$ ). El contenido de COS (%) fue alto y el de Nt (%) muy alto, lo que dio como resultado una relación C/N baja (Tabla 4).

### 3.3 Diversidad de especies arbóreas

Excepto el acahual con sistema agroforestal, el cual fue significativamente menos diverso ( $p < 0.01$ ), no se encontraron diferencias significativas en la diversidad de especies entre tratamientos. En cuanto a la riqueza de especies arbóreas el tratamiento que presentó mayor número fue el acahual con dos aclareos (27), apenas una más que el acahual natural, mientras que el de menor riqueza (15) fue el acahual enriquecido con *P. dioica* (Tabla 5). El promedio de especies arbóreas encontradas en los acahuales estudiados fue de 22 / 1000 m<sup>2</sup>.

## 4. Discusión

### 4.1. Stocks de carbono

La falta de diferencias significativas en contenido de carbono total entre tratamientos, en gran medida se debió al peso proporcional que tuvo el COS, el cual no difirió entre tratamientos. Los suelos de la zona de estudio a pesar de ser poco profundos contribuyeron con más del 50 % del C total, lo cual coincide con otros estudios de la península de Yucatán (Vargas *et al.* 2008). Resultados similares han sido reportados donde el COS no varió significativamente entre acahuales de diferente edad o manejo (Kotto - Same *et al.* 1997; Soto-Pinto *et al.* 2010; Orihuela-Belmonte *et al.* 2013). Lo anterior, probablemente se debe a que el carbono orgánico del suelo es más estable que el carbono contenido en la vegetación (Hughes *et al.* 1999; Burton y Pregitzer, 2008; Soto-Pinto *et al.* 2010) y los procesos de cambio en el contenido de carbono por cambios en el uso del suelo son más lentos. El contenido de COS en las parcelas investigadas es considerablemente mayor que el reportado para suelos del trópico en términos de porcentaje/peso (Sanchez, 1976) y en  $\text{Mg ha}^{-1}$  a la profundidad muestreada (0.3 m) (Batjes, 1999). Mendoza-Vega y Messing (2005) reportaron contenidos altos de COS en suelos similares (calcáreos) de la Selva Lacandona. En suelos de pH alcalino, el alto contenido de iones de calcio intercambiables forman moléculas con sustancias húmicas, que protegen a la materia orgánica de la descomposición (Duchaufour, 1976; Zech *et al.*, 1990).

El aclareo de los acahuales parece tener un impacto positivo en la acumulación de biomasa. El tratamiento con tres aclareos fue el que presentó el valor más alto en biomasa, aunque no significativamente mayor al tratamiento con acahuales naturales. Al retirar individuos poco vigorosos o malformados se estimula el crecimiento de la población arbórea que es mantenida en pie, ya que se elimina la competencia y se acelera la acumulación de biomasa y por ende la acumulación de carbono (Vargas *et al.* 2009).

Por otro lado, la introducción de especies comerciales en el enriquecimiento de acahuales parece tener un efecto opuesto, los tratamientos con enriquecimiento de *P. dioica* y el sistema agroforestal con *S. macrophylla* y *C. sinensis* tuvieron significativamente ( $p < 0.001$ ) menor biomasa que el tratamiento con tres aclareos.

Probablemente el establecimiento de las plántulas de especies causa un grado de perturbación en los acahuales que se ve reflejado en un menor contenido de biomasa, aunado a esto, la contribución al contenido de biomasa dependerá de las características dendrológicas de las especies plantadas; *C. sinensis* no es de desarrollo robusto y *P. dioica* *S. macrophylla* son de lento crecimiento.

Se esperaba que los tratamientos con aclareos tuvieran mayor contenido de materia orgánica muerta como consecuencia del manejo, sin embargo, debido a la variación en los datos sólo se percibe la tendencia de que los acahuales con aclareos y los naturales presentaron valores más altos que los acahuales con otros tratamientos, por lo tanto se puede mencionar que se rechaza la hipótesis.

La clase diamétrica en la que se encontró concentrada la mayor cantidad de individuos que componen la mayor parte de la biomasa en todos los tratamientos fue la de 10 a 20 cm de DAP, esto es algo de esperarse debido a que los acahuales estudiados corresponden a una etapa sucesional temprana.

#### 4.2. Propiedades del suelo

Los valores de las propiedades de los suelos de estudio son otro indicador de que el manejo forestal influyó en el contenido de biomasa. Los tratamientos con los suelos relativamente más fértiles, no fueron los que obtuvieron el contenido de biomasa más alto como habría de esperarse (Molles, 2001); el tratamiento con *S. macrophylla* y *C. sinensis*, con la CIC más alta tuvo el menor ( $p < 0.001$ ) contenido de biomasa entre todos los tratamientos. Asimismo, el contenido de nitrógeno en el suelo, que junto con el fósforo, son los elementos que en los ecosistemas terrestres limitan el desarrollo de las plantas por la *ley del mínimo* (Schlesinger, 1997), sólo explica el 26% de la variación de la cantidad de carbono acumulado en la biomasa. Es importante mencionar que el contenido de nitrógeno total en los suelos de estudio fue muy alto. La relación C/N es utilizada como parámetro de calidad de los restos orgánicos, determina el grado de humificación de la materia orgánica (FitzPatrick, 1984). Con la mineralización de la materia orgánica se estabiliza el contenido de C en forma de humus, el cual es estable y mantiene una buena actividad biológica. Sin embargo en los suelos de estudio el contenido de C es alto, no obstante la relación C/N fue baja entre 3.9 y 5.3. Una

explicación probable a esto es la fijación química del nitrógeno en forma de aminas, amidas, proteínas y otras sustancias orgánicas (Stevenson, 1994), lo cual es común en suelos calcáreos (Duchaufour, 1976; Zech *et al.*, 1990), como los de la zona de estudio. Con este antecedente, la práctica de aclareos se sugiere como una medida para secuestrar CO<sub>2</sub> en el suelo, siempre y cuando que se mantenga la materia orgánica muerta.

#### *4.3. Diversidad de especies arbóreas*

Los resultados de este estudio indican que hasta el momento, las estrategias de manejo forestal consistentes en aclareos y en enriquecimiento de acahuals no tuvieron efectos sobre la diversidad de especies arbóreas. Esto sugiere que aun cuando se realicen aclareos la diversidad de leñosas no se verá afectada. Sin embargo, sería recomendable evaluar el efecto del manejo forestal en la diversidad de otros organismos. Además, es importante considerar dentro de las estrategias de aprovechamiento forestal, la conservación de la diversidad (Acopa y Boege, 1999).

### **5. Conclusión**

El efecto del manejo forestal evaluado en el presente estudio sobre los reservorios de carbono se observa principalmente en el componente arbóreo. A pesar a que el análisis estadístico mostró que los acahuals naturales no difieren significativamente a los acahuals con tres y dos aclareos en el contenido de carbono en la biomasa, se observa que los acahuals naturales presentan suelos más ricos en Nt y P, lo que influye en la dinámica de crecimiento de la vegetación y por lo tanto en la acumulación de carbono por la misma, caso contrario a los acahuals con aclareos en donde los suelos no presentaron los valores más altos en nutrientes del suelo y aun así presentaron más cantidad de carbono, lo que sugiere el efecto del manejo en la acumulación de carbono. No así, contrario a lo esperado, en el contenido de materia muerta; por lo menos no claramente visible en acahuals de 15 años. El suelo, el reservorio de carbono más importante (en este trabajo comprendió el 59 % del carbono total del sistema) y estable en ecosistemas terrestres, no mostró el efecto de las prácticas de manejo evaluadas. Los cambios en el contenido de carbono orgánico en

suelos consisten en procesos lentos que difícilmente pueden ser apreciados en el manejo de acahuales jóvenes. Considerando que el destino final de la materia orgánica en un bosque es el suelo, se recomiendan los aclareos para propiciar el reciclaje de nutrientes y el secuestro de CO<sub>2</sub> atmosférico. Esta práctica de aclareos, según la información obtenida no afecta la diversidad de especies leñosas del acahual.

En la búsqueda de estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático, han surgido importantes iniciativas como los mecanismos de Reducción de Emisiones (de gases de efecto de invernadero) de la Deforestación y Degradación de bosques (REDD). En este contexto, el manejo comunitario de los recursos forestales como el analizado en el presente estudio, puede considerarse útil para la construcción de otros modelos de manejo en áreas tropicales y ejemplo a seguir para otras comunidades de la región y del país.

## **Agradecimientos**

Los autores agradecen a la Asociación Regional de Silvicultores de Calakmul por todo el apoyo ofrecido, en especial a Juan Manuel Herrera Gloria por las facilidades brindadas, Marcos René Bacab y a Manuel Arana por el apoyo en campo, y a los productores de las parcelas evaluadas, a Manuel Gutiérrez y Miguel Ángel López Anaya por su ayuda en el procesamiento de las muestras de laboratorio, a Efraín Aguirre Cortés por revisión de estilo y formato, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Postgrado de El Colegio de la Frontera Sur por el apoyo económico para llevar a cabo esta investigación.

## **Referencias**

- Acopa D. and E. Boege. 1999. Las Selvas mayas en el sur de Campeche, México: Experiencias en la construcción de la forestería social en Calakmul. En Primack R, Bray D, Galletti H, Ponciano I. (Eds.) La Selva Maya: Conservación y desarrollo. Siglo XXI. Editores. México.
- Albrecht A. and S. Kandji. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. Agriculture, Ecosystems and Environment, Vol: 99, 15–27.

- Angelsen, A., Brockhaus, M., Kanninen, M., Sills, E., Sunderlin, W.D., Wertz - Kanounnikoff, S. (Eds.). 2009. Realising REDD+: National Strategy and Policy Options. CIFOR, Bogor, Indonesia, p. 362.
- Bass S., Dubois, O., Moura Costa, P., Pinard, M., Tipper, R. and Wilson, C. 2000. Rural livelihoods and carbon management, IIED Natural Resource Issues Paper No.1. International Institute for Environment and Development, London.
- Batjes, N.H., 1999. Management options for reducing CO<sub>2</sub>-concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil. Report 410-200-031, Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change y Technical Paper 30, International Soil Reference and Information Centre, Wageningen.
- Bray, D. B., E. Duran, V. H. Ramos, J.-F. Mas, A. Velazquez, R. B. McNab, D. Barry, and J. Radachowsky. 2008 Tropical deforestation, community forests, and protected areas in the Maya Forest. *Ecology and Society*, 13(2): 56
- Brown S, Swingland I, Hanbury-Tenison R, Prance G, Myers N. 2002. Changes in the Use and Management of Forests for Abating Carbon Emissions: Issues and Challenges under the Kyoto Protocol. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 360, No. 1797, Carbon, Biodiversity, Conservation and Income: An Analysis of a Free-Market Approach to Land-Use Change and Forestry in Developing and Developed Countries. 1593-1605.
- Brown, S., L. R. Iverson, A. Prasad, and D. Liu. 1993. Geographical distributions of carbon in biomass and soils of tropical Asian forests. *Geocarto International* 4:45-59.
- Brown S, Lugo A. 1990. Tropical secondary forests. *Journal of Tropical Ecology*, 6, 1-32.
- Burton A. and K. Pregitzer. 2008. Measuring Forest Floor, Mineral Soil and Root Carbon stocks. En Hoover (Ed.) *Field Measurements for Forest Carbon Monitoring*, Springer Science. 129-142.
- Cairns M. and D.P. Garrity. 1999. Improving shifting cultivation in Southeast Asia by building on indigenous fallow management strategies. *Agroforestry Systems*, Vol 47, 37-48.
- Cairns M, Brown S, Helmer E, Baumgardner G. 1997. Root Biomass Allocation in the World's Upland Forests. *Oecologia*, Vol. 111, No. 1, 1-11.
- Canadell J. and M. Raupach. 2008. Managing Forests for Climate Change Mitigation. *Science* Vol. 320, 1456-1457.
- Ceccon E, Olmsted I, Campo-Alves J. 2002. Vegetación y propiedades del suelo en dos bosques tropicales secos de diferente estado regeneracional en Yucatán. *Agrociencia, Colegio de Postgraduados*. vol. 36, núm. 5, septiembre-octubre, 621-63.

- Chazdon R, Harvey C, Komar O, Griffith D, Ferguson B, Martínez-Ramos M, Morales H, Nigh R, Soto-Pinto L, van Breugel M, Philpott S. 2008. Beyond Reserves: A research agenda for conserving biodiversity in human-modified tropical landscapes. *Biotropica*.
- Dixon, R. K., Brown S., Houghton R. A, Solomon A. M., Trexler M. C., Wisniewski J. 1994. Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science, New Series*, Vol. 263, No. 5144 (Jan. 14, 1994), 185-190.
- Durán R, Campos G, Trejo JC, Simá P, May-Pat F, Juan- Qui M. 2000. Listado florístico de la Península de Yucatán. CICY. México.
- Duchaufour, P. 1976. Dynamics of organic matter in soils of temperate regions: its action on pedogenesis. *Geoderma* 15: 31-40.
- FitzPatrick, E. A. 1984. Suelos: su formacion clasificacion y distribucion. CECSA. 430 pp.
- Fredericksen T, and F. Putz. 2003. Silvicultural intensification for tropical forest conservation. *Biodiversity and Conservation*. Vol 12, 1445–1453.
- Gamboa A, Hidalgo C, De Leon F, Etchevers J, Gallardo J, Campo J. 2010. Nutrient Addition Differentially Affects Soil Carbon Sequestration in Secondary Tropical Dry Forests: Early- versus Late-Succession Stages. *Restoration Ecology*. Vol. 18, No. 2, 252–260.
- Guariguata M.R. 1999. Early response of selected tree species to liberation thinning in a young secondary forest in Northeastern Costa Rica. *Forest Ecology Management*, Vol:124, 255-261.
- Harmon M. and C. Hua. 1991. Coarse Woody Debris Dynamics in Two Old-Growth Ecosystems Comparing a deciduous forest in China and a conifer forest in Oregon. *BioScience*. Vol 41. N. 9. 604 - 610.
- Hughes R, Kauffman B, Jaramillo V. 1999. Biomass, carbon, and nutrient dynamics of secondary forests in a humid tropical region of Mexico. *Ecology*. 80 (6) 1892-1907.
- INEGI. 1985. Carta edafológica. Chetumal E16-4-7. Escala 1:250 000. México.
- INEGI. 2011. Perspectiva estadística Campeche. México.
- Kepleis P. 2004. Forest Extraction to Theme Parks: The Modern History of Land Change. En: Turner B, Geghegan J, Foster D. 2004. *Integrated Land-Change Science and Tropical Deforestation in the Southern Yucatan*. Final Frontiers. Oxford University Press. United States.

- Klooster D, Masera O. 2000. Community forest management in Mexico: carbon mitigation and biodiversity conservation through rural development. *Global Environmental Change* 10: 259-272
- Kotto - Same J, Woomer P, Appolinaire M, Louis Z. 1997. Carbon dynamics in slash-and-burn agriculture and land use alternatives of the humid forest zone in Cameroon. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 65, 245-256.
- Lal R. 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*. 220, 242–258.
- Mendoza-Vega, J., Karlton, E., Olsson, M., 2003. Estimations of amounts of soil organic and fine root carbon in land use and land cover classes, and soil types of Chiapas highlands, Mexico. *Forest Ecology and Management* 177, 1 – 16.
- Mendoza - Vega J. and I. Messing. 2005. The influence of land use and fallow period on the properties of two calcareous soils in the humid tropics of southern Mexico. *Catena*. 60. 279–292
- Miranda F. 1978. Vegetación de la Península Yucateca: Rasgos fisiográficos y la vegetación. Colegio de Postgraduados, México. pp.271
- Molles M. C. 2001. *Ecology: Concepts and Applications*. Mc Graw Hill. New York 169 pp.
- Moreno C. E. 2001. Métodos para medir la biodiversidad. MyT–Manuales y Tesis SEA, vol.1. Zaragoza, 84 pp.
- Orihuela - Belmonte D.E., B.H.J. de Jong, J. Mendoza-Vega, J. Van der Wal, Paz-Pellat, Soto-Pinto L, Flamenco - Sandoval A. 2013. Carbon stocks and accumulation rates in tropical secondary forests at the scale of community, landscape and forest type, *Agriculture, Ecosystems y Environment*, Volume 171, 1, pp. 72-84
- Pearson T, Walker S, Brown S, 2005. Sourcebook for Land use, land-use change and forestry projects. BioCF, Winrock International. pp.57
- Porter-Bolland L, Ellis E, Guariguata M, Ruiz-Mallén I, Negrete-Yankelevich S, Reyes-García V. 2011. Community managed forests and forest protected areas: An assessment of their conservation effectiveness across the tropics. *Forest Ecology Management*. 1-12.
- Programa Mexicano del Carbono, 2011. Manual de Campo para el Inventario Forestal Comunitario Cuantitativo. Bajo la Coordinación de Fernando Paz; con la colaboración Marcos Casiano, Carlos Omar Cruz, Jesús Argumedo, Ben de Jong, y Rafael Flores. México, D.F., pp. 127.

- Rendón N. y L. Soto-Pinto. 2007. Metodología rápida para la estimación y monitoreo de Captura de Carbono. El Colegio de la Frontera Sur. México.
- Sanchez, P.A. 1976. Properties and management of soils in the tropics. Wiley, New York. 618 pp.
- Saynes V, Etchevers J, Galicia L, Hidalgo C, Campo J. 2012. Soil carbon dynamics in high-elevation temperate forests of Oaxaca (Mexico): thinning and rainfall effects. *Bosque* 33(1), 3-11.
- Schlesinger, W.H., 1997. Biogeochemistry: an analysis of global change." *Biogeochemistry: an analysis of global change*. Academic Press. 588 pp.
- Schroeder, P. 1991. Can Intensive Management Increase Carbon Storage in Forests?. *Environmental Management* Vol. 15, No. 4, 475-481.
- Sosa V, Flores S, Rico- Gray V, Lira R, Ortiz J. 1985. *Etnoflora Yucatanense: Lista Florística y Sinonimia Maya*, fascículo 1. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos, Xalapa, Veracruz, México. 225 pp.
- Soto-Pinto L, Anzueto M, Mendoza J, Jiménez Ferrer G, de Jong B. 2010. Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforest Syst.* 78:39–51
- Stevenson, F. J. (1994). *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. Wiley. 496 pp.
- Tamarit J.C. y J. López. 2007. *Xilotecología: de los principales árboles tropicales de México*. Libro TÉCNICO No. 3 INIFAP- CIR Golfo Centro, Campo Experimental San Martinito. Tlahuapan, Puebla. México. 264 pp.
- Tamarit, J.C. y M. Fuentes. 2003. Parámetros de humedad de 63 maderas latifoliadas mexicanas en función de su densidad básica. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, Vol. 9, Núm. 2, Universidad Autónoma Chapingo, México, pp. 155-164
- Urquiza - Hass T, Dolman P, Peres C. 2007. Regional scale variation in forest structure and biomass in the Yucatan Peninsula, Mexico: Effects of forest disturbance. *For. Ecol. Manage.* 247, 80-90.
- Vargas R, Allen M, Allen E. 2008. Biomass and carbon accumulation in a fire chronosequence of a seasonally dry tropical forest. *Global Change Biology*, 14, 109–124.
- Vargas R, Allen E, Allen M. 2009. Effects of Vegetation Thinning on Above- and Belowground Carbon in a Seasonally Dry Tropical Forest in Mexico. *Biotropica* 41(3), 302–311.

- Verburg, R., and C. van Eijk-Bos. 2003. Effects of selective logging on tree diversity, composition and plant functional type patterns in a Bornean rain forest. *Journal Of Vegetation Science*, 14(1), 99-110
- Vester H, y A. Navarro - Martínez. 2007. Aspectos ecológicos en el manejo comunitario de bosques tropicales en Quintana Roo, México pp.231-266. in Bray D, Merino L, Barry D (eds.) Los Bosques Comunitarios de México: Manejo Sustentable de Paisajes Forestales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología-Instituto de Geografía de la Universidad Autónoma de México -Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible-Florida International University, Mexico City.
- Wagner V. 1968. The Line Intersect Method In Forest Fuel Sampling". *Forest Science*. Volume 14, número 1. 20-26.
- Wang W, Wei X, Liao W, Blanco J, Liu Y Liu S, Liu G, Zhang L, Guo X, Guo S. 2012. Evaluation of the effects of forest management strategies on carbon sequestration in evergreen broad-leaved (*Phoebe bournei*) plantation forests using FORECAST ecosystem model. Artículo en prensa.
- Zech, W., Hempfling, R., Haumaier, L., Schulten, H. R., & Haider, K. 1990. Humification in subalpine Rendzinas: chemical analyses, IR and <sup>13</sup>C NMR spectroscopy and pyrolysis-field ionization mass spectrometry. *Geoderma*, 47(1), 123-138.

## Anexos

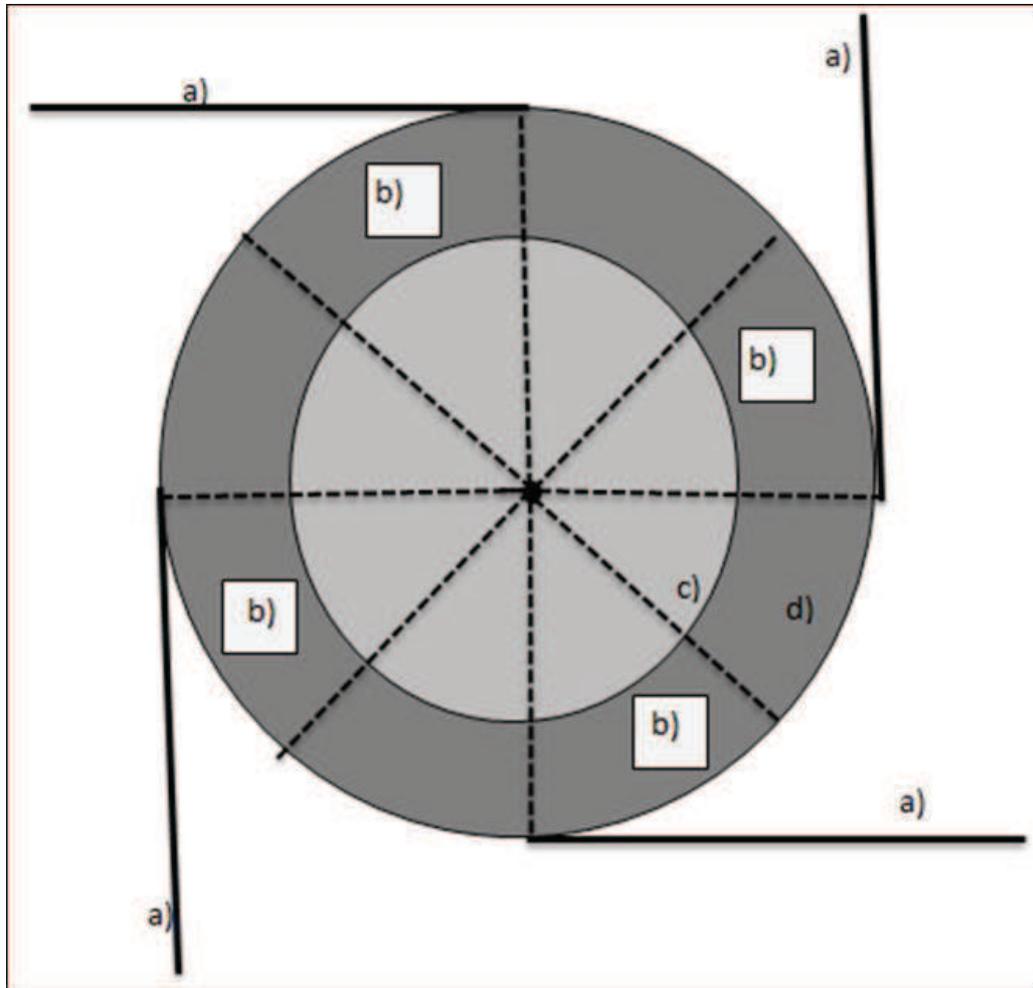


Fig. 1. Diseño de las parcelas de muestreo:

Fig. 1. Design of the experimental plots

- a) 4 Transectos para la colecta de ramas caídas (25 m)
- b) Hojarasca, Suelo, Herbáceas ( $1 \text{ m}^2$ )
- c) Juveniles en parcela de  $400 \text{ m}^2$
- d) Árboles adultos en parcela de  $1000 \text{ m}^2$

Tabla 1. Ecuaciones utilizadas para determinar la biomasa y el carbono contenido en reservorios de acahuales de Valentín Gómez Farías y Álvaro Obregón, Calakmul

Table 1. Equations used to determine biomass and carbon content in reservoir of secondary forest from Valentín Gómez Farías y Zoh Laguna, Calakmul

	Ecuación utilizada	Referencia
Arboles adultos (>10 cm DAP)	$Y = \exp \{-2.12605 + 0.868 \ln (DAP^2 h)\} \rho / 0.72$	Urquiza <i>et al.</i> (2007)
Arboles jóvenes (<10 cm DAP)	$Y^* = (\exp (4.9375 + 1.0583 \ln (DAP^2))) * CF / 10^6$	Hughes <i>et al.</i> (1999)
Alturas de arboles	$h = 4.3558 \ln (DAP) - 1.8942$	Este estudio
Raíces totales	$Y^{**} = \exp (-1.0587 + 0.8836 \ln ABD)$	Cairns <i>et al.</i> (1997)
Volumen de ramas caídas	$V = \pi^2 d^2 / 8L$	Wagner (1968)
Volumen tocones	$V = \pi r^2 h$	

Donde  $Y$  = biomasa (kg),  $\rho$  = densidad por especie,  $d$  = diámetro pecho (cm),  $h$  = altura (m),  $Y^*$  = biomasa (Mg),  $CF$  = factor de corrección: 1.14,  $Y^{**}$  = Biomasa total de raíces (Mg/ha),  $\exp (n) = 2.718^n$ ,  $ABD$  = Herbáceas y biomasa arbórea: juveniles, adultos, árboles muertos en pie, tocones (solo se consideraron los árboles muertos y tocones en estado de descomposición 1 y 2).

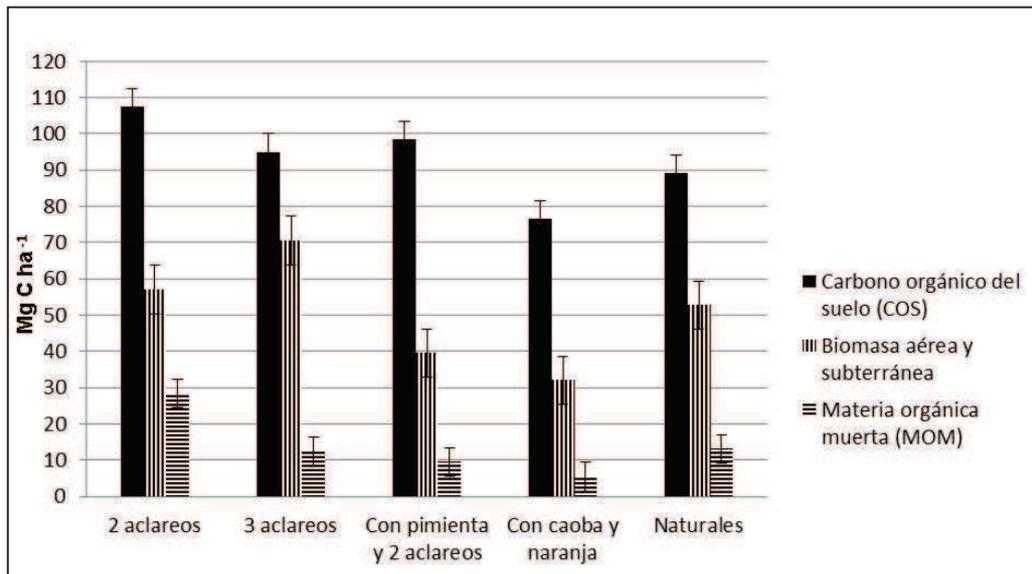


Fig. 2. Distribución de carbono (Mg C ha<sup>-1</sup>) por reservorio y tratamiento

Fig. 2. Carbon distribution (Mg C ha<sup>-1</sup>) by reservoir and treatment

Tabla 2. Valores medios y desviación estándar ( $\pm$ ) del contenido de carbono ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) por reservorio y tratamiento  
 Table 2. Mean values and standard deviation ( $\pm$ ) of carbon content ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) by reservoir and treatment

	Biomasa $\text{Mg C ha}^{-1}$				Materia orgánica muerta $\text{Mg C ha}^{-1}$				Carbono orgánico en el suelo 0-30 cm	TOTAL	
	Árboles (Juveniles y adultos)	Herbáceas	Raíces	Total	Hojarasca	Tocones	Árboles muertos en pie	Ramas, troncos caídos			Total
2 aclareos	46.6 $\pm$ 1.4 AB	0.6 $\pm$ 0.3	9.8 $\pm$ 0.3 AB	57.2 $\pm$ 1.5 AB	9.5 $\pm$ 3.1 A	18.5 $\pm$ 12.6 AB	0.5 $\pm$ 0.2 B	0.0002 $\pm$ 0.0001384	28.5 $\pm$ 16.1	107.3 $\pm$ 29.6	193.1 $\pm$ 32.0
3 aclareos	58.5 $\pm$ 5.4 A	0.4 $\pm$ 0.2	11.5 $\pm$ 0.9 A	70.5 $\pm$ 6.0 A	7.0 $\pm$ 2.4 AB	5.1 $\pm$ 1.2 ABC	0.6 $\pm$ 0.3 B	0.0001 $\pm$ 0.0000519	12.8 $\pm$ 2.2	95.0 $\pm$ 20.6	178.4 $\pm$ 17.6
Con <i>P. dioica</i> y 2 aclareos	32.1 $\pm$ 5.7 BC	0.4 $\pm$ 0.2	6.9 $\pm$ 1.0 BC	39.6 $\pm$ 6.7 BC	3.0 $\pm$ 1.2 B	6.4 $\pm$ 1.8 ABC	0.05 $\pm$ 0.07 BC	0.0002 $\pm$ 0.000173	9.5 $\pm$ 4.3	131.2 $\pm$ 98.1	180.3 $\pm$ 55.4
Con <i>S. macrophylla</i> y <i>C. sinensis</i>	26.1 $\pm$ 6.2 C	0.3 $\pm$ 0.1	5.6 $\pm$ 1.2 C	32.0 $\pm$ 7.4 C	4.9 $\pm$ 2.9 AB	0.4 $\pm$ 0.5 D	0.09 $\pm$ 0.1 BC	0.00003 $\pm$ 0.0000346	5.4 $\pm$ 2.9	76.4 $\pm$ 10.0	113.9 $\pm$ 10.5
Naturales	43.0 $\pm$ 10.3 ABC	0.5 $\pm$ 0.2	9.1 $\pm$ 2.0 AB	52.8 $\pm$ 12.5 AB	4.4 $\pm$ 2.7 AB	7.2 $\pm$ 10.1 ABCD	1.2 $\pm$ 1.6 A	0.0002 $\pm$ 0.0002016	13.0 $\pm$ 10.7	89.1 $\pm$ 37.8	154.9 $\pm$ 28.2

Análisis de varianza (ANOVA\*, Kruskal Wallis\*\*)

0.001\*

0.617\*

0.002\*

0.001\*

0.047\*

0.043\*\*

0.039\*\*

0.442\*

0.089\*

0.216\*\*

0.095\*

Valores medios en las columnas con letras distintas son significativamente diferentes

Tabla 3. Distribución de biomasa seca (Mg ha<sup>-1</sup>) por clase diamétrica y tratamiento

Table 3. Dry biomass distribution (M ha<sup>-1</sup>) by diameter class and treatment

	<5 cm	5-10 cm	10-20 cm	20-50 cm
2 aclareos	5 AB	14.29	48.02 A	25.98
3 aclareos	2.89 B	14.45	45.53 AB	39.69
Con <i>P. dioica</i> y 2 aclareos	3.05 B	10.03	29.78 BC	14.05
Con <i>S. macrophylla</i> y <i>C. sinensis</i>	7.75 A	15.78	17.17 C	11.53
Naturales	4.87 AB	19.24	33.60 AB	28.65
<b>ANOVA (p)</b>	<b>0.007</b>	<b>0.52</b>	<b>0.0005</b>	<b>.086</b>

Tabla 4. Valores medios y desviación estándar ( $\pm$ ) de las propiedades físico-químicas de los suelos por tratamiento

Table 4. Mean values and standard deviation ( $\pm$ ) of soil properties by treatment

Tratamiento	pH	CIC (cmol/kg)	N total (%)	P (ppm)	COS (%)	Arcilla (%)	Densidad aparente (Mg/m <sup>3</sup> )	C/N
2 aclareos	7.85 $\pm$ 0.01	32.20 $\pm$ 6.75 A	1.83 $\pm$ 0.35 AB	7.48 $\pm$ 0.69 A	9.71 $\pm$ 2.59 A	31.07 $\pm$ 10.38 A	0.59 $\pm$ 0.03	5.3
3 aclareos	7.91 $\pm$ 0.03	31.65 $\pm$ 1.56 A	1.76 $\pm$ 0.17 AB	6.76 $\pm$ 0.86 A	8.04 $\pm$ 0.35 A	30.62 $\pm$ 3.63 A	0.55 $\pm$ 0.02	4.6
Con <i>P. dioica</i> y 2 aclareos	8.08 $\pm$ 0.10	29.55 $\pm$ 2.25 A	1.39 $\pm$ 0.17 AB	7.70 $\pm$ 1.21 A	6.71 $\pm$ 1.38 AB	31.07 $\pm$ 4.50 A	0.96 $\pm$ 0.35	4.8
Con <i>S. macrophylla</i> y <i>C. sinensis</i>	7.92 $\pm$ 0.07	44.98 $\pm$ 0.86 B	0.90 $\pm$ 0.07 A	6.70 $\pm$ 0.17 A	3.86 $\pm$ 0.17 B	52.62 $\pm$ 3.29 B	0.72 $\pm$ 0.09	4.2
Naturales	8.02 $\pm$ 0.11	27.57 $\pm$ 4.03 A	1.86 $\pm$ 0.45 B	10.32 $\pm$ 0.45 B	7.37 $\pm$ 1.12 A	27.53 $\pm$ 4.70 A	0.63 $\pm$ 0.07	3.9
<b>ANOVA (p)</b>	<b>0.0633</b>	<b>0.0008</b>	<b>0.0329</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.005</b>	<b>0.0009</b>	<b>0.092</b>	

Tabla 5. Diversidad de especies arbóreas en los acahuales con diferentes tratamientos.

Table 5. Diversity of tree species in the secondary forests with different treatments

	Riqueza de especies	Índice de Shannon	Especies dominantes	
			Nombre común	Nombre científico
2 aclareos	27	2.76 A	Guayabillo	<i>Myrcianthes fragrans</i> (Sw) McVayugh
			Xuul amarillo	
			Laurelillo	<i>Lonchocarpus xuul</i> Lundel.
			Ubero	
			Cascarillo	<i>Licaria campechiana</i> (Standl.) Kosterm.
3 aclareos	20	2.52 A	Chakah rojo	<i>Bursera simarruba</i> (L.) Sarg
			Cascarillo	<i>Croton glabellus</i> L
			Xuul amarillo	<i>Lonchocarpus xuul</i> Lundel.
			Campanilla	<i>Cascabela thevetia</i> (L.) Lippold.
			Zapote faisán	<i>Dipholis salicifolia</i> (L.) A. DC.
Con <i>P. dioica</i> y 2 aclareos	18	2.46 A	Chakah rojo	<i>Bursera simarruba</i> (L.) Sarg
			Xuul amarillo	<i>Lonchocarpus xuul</i> Lundel.
			Campanilla	<i>Cascabela thevetia</i> (L.) Lippold.
			Zapote faisán	<i>Dipholis salicifolia</i> (L.) A. DC.
			Guayabillo	
Con <i>S. macrophylla</i> y <i>C. sinensis</i>	15	1.56 B	Cascarillo	<i>Myrcianthes fragrans</i> (Sw) McVayugh
			Jabín	<i>Croton glabellus</i> L
			Xuul amarillo	<i>Pscidia piscipula</i>
			Caoba	<i>Lonchocarpus xuul</i> Lundel.
			Jabín	<i>Swietenia macrophylla</i> King
Naturales	25	2.60 A	Jabín	<i>Croton glabellus</i> L
			Cascarillo	<i>Pscidia piscipula</i>
			Chakah rojo	<i>Croton glabellus</i> L
			Xuul amarillo	<i>Bursera simarruba</i> (L.) Sarg
			Laurelillo	<i>Lonchocarpus xuul</i> Lundel
Naturales	25	2.60 A	Guayabillo	<i>Licaria campechiana</i> (Standl.) Kosterm.
			Ramón	<i>Myrcianthes fragrans</i> (Sw) McVayugh
			Boob	
				<i>Brosimum alicastrum</i> Sw.
				<i>Coccoloba spicata</i> Lundell

ANOVA (p)

0.00001

Valores medios en las columnas con letras diferentes son significativamente diferentes

## CAPITULO FINAL

Los acahuales estudiados en la presente investigación mostraron entre 113.95 y 193.13 ton ha<sup>-1</sup> de carbono total (biomasa: aérea y subterránea, materia orgánica muerta y carbono orgánico del suelo).

El reservorio que presentó el mayor contenido de carbono fue el suelo (59% del carbono total) aun cuando los suelos estudiados fueron delgados. El alto contenido de materia orgánica y por lo tanto de carbono, se puede explicar debido a la alcalinidad y la textura de los suelos que permiten la estabilización de la materia orgánica (Six *et al*, 2002). Se observó que el carbono orgánico del suelo (COS) no varía significativamente entre los acahuales con diferentes estrategias de manejo forestal, esta situación ya había sido reportada por algunos estudios (Kotto- Same *et al*, 1997; Soto-Pinto *et al*, 2010; Orihuela-Belmonte *et al*, 2013). Lo anterior probablemente se debe a que el COS es más estable que el carbono contenido en la vegetación (Hughes *et al*, 1999; Burton & Pregitzer, 2008; Soto-Pinto *et al*, 2010). Debido a que el COS es el reservorio con más carbono, es importante que dentro de las estrategias de manejo forestal se considere la conservación de la materia orgánica del suelo; permitir que los restos de madera se acumulen resulta en una reserva de carbono (Harmon & Hua, 1991; Vargas *et al*, 2009; Wang *et al*, 2012).

El efecto del manejo forestal, evaluado en este estudio en los reservorios de carbono se observa principalmente en el componente arbóreo, al modificar la estructura de la vegetación se influye en la acumulación de carbono. Siendo la práctica de aclareos la que se observa que puede tener un mayor impacto en la acumulación de carbono. Los tratamientos con los suelos más fértiles (mayor

contenido de Nt, P y C.I.C) no fueron los que obtuvieron el contenido de biomasa más alto como habría de esperarse. A pesar a que el análisis estadístico mostró que los acahuales naturales no difieren significativamente a los acahuales con tres y dos aclareos, se observa que los acahuales naturales presentan suelos más ricos en Nt y P lo que influye en la dinámica de crecimiento de la vegetación y por lo tanto en la acumulación de carbono por la misma, caso contrario a los acahuales con aclareos en donde los suelos no presentaron los valores más altos en nutrientes del suelo y aun así presentan mayor cantidad de carbono, lo que puede sugerir el efecto del manejo en la acumulación de carbono. Los resultados muestran que el contenido de nitrógeno en el suelo explica solo el 26% de la variación de la cantidad de carbono acumulado en la biomasa (raíces, herbáceas, arboles adultos y jóvenes), por esta razón se espera que la variación restante se deba al posible efecto de los aclareos en la acumulación de biomasa y carbono debido a que el acahual con tres aclareos, con mayor cantidad de carbono en dicho reservorio, presenta menos nitrógeno total y fósforo en el suelo que los acahuales naturales. En cuanto a la estrategia de manejo de enriquecimiento de acahuales (con *P. dioica* y 2 aclareos) no se ve un incremento significativo en el contenido de carbono, ya que los acahuales de este tratamiento resultaron con menor contenido de carbono en la biomasa (39.6 C ton ha<sup>-1</sup>) que los acahuales naturales (52.8 C ton ha<sup>-1</sup>). Lo anterior se puede deber a las características de crecimiento de la Pimienta.

En relación a la diversidad de especies arbóreas los resultados indicaron, que hasta el momento, las estrategias de manejo forestal consistentes en aclareos y en enriquecimiento de acahuales no tuvieron grandes efectos sobre la diversidad

de especies arbóreas. Incluso los acahuales naturales presentaron en cuanto a riqueza de especies una especie menos que el acahual con dos aclareos. El tratamiento que si mostro diferencias significativas fue el sistema agroforestal *S. macrophylla* y *C. sinensis*. Es recomendable continuar evaluando el efecto del manejo forestal en la diversidad de especies arbóreas y de otros organismos, para conocer el efecto de las prácticas de manejo en el funcionamiento de los ecosistemas. Es importante que se considere dentro de las estrategias de aprovechamiento forestal la conservación de la diversidad de especies (Acopa & Boege, 1999).

El manejo de los recursos forestales por comunidades puede considerarse como un componente de las estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático, además que permite la generación de ingresos por el aprovechamiento de los recursos; sin embargo es importante continuar conociendo los efectos del manejo forestal en las funciones del ecosistema, particularmente en suelos y a largo plazo. Otro factor importante a considerar en la elaboración de estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático en el sector forestal es el capital social; es necesario que las comunidades estén organizadas y con un capital social fortalecido. La organización comunitaria través de la ARS Productores Forestales de Calakmul A.C ha permitido el establecimiento del manejo forestal y de la conservación de los sumideros de carbono en la zona, lo que resulta en un ejemplo ya en práctica de estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático por comunidades.

Lanna, Gumpchoh, Campeche, a 20 de Junio de 2013.

Comité de Ética en Investigación  
**PRESENTE**

**Presentación de protocolo de Investigación.**

En mi calidad de tutor/a de la estudiante Andrea Venegas Sandoval, que presenta el protocolo de tesis "Efecto del manejo forestal en el contenido de carbono en vegetación y suelo de acahuales de Calakmul, México" hago constar que se ha leído la "Guía para la incorporación de aspectos éticos en los protocolos de investigación" que se comprenden todos sus términos, y (seleccionar uno de los siguientes dos enunciados)

*a) no se identifican consideraciones éticas que requieran revisión por parte del Comité de Ética en la Investigación.*

*b) se identifican aspectos de investigación que requieren ser revisados por el Comité de Ética en la Investigación (señale cuál [es] )*

Permisos    
Consentimiento informado (  )   
Protección de las personas (  )   
Manejo de animales de laboratorio (  )

Me comprometo a que la investigación sea realizada dando cumplimiento a las normas institucionales y leyes vigentes. Así como a informar oportunamente al Comité de Ética, cualquier problema no previsto o de la ocurrencia de eventos adversos serios que impliquen cualquier principio ético, señalado en la guía.

Dr. Jorge Mendoza Vega  
Nombre y Firma del Tutor/a

  
BIOL. Andrea Venegas Sandoval  
Nombre y Firma de la estudiante



San Francisco Campeche, a 7 de mayo de 2012

Asunto: Solicitud de permiso para trabajar en acahuales de Calakmul

**Ing. Juan Manuel Herrera Gloria**  
Comisario ejidal Valentín Gómez Fariás  
Productores forestales de Calakmul A.C

**PRESENTE**

Me dirijo a usted para solicitarle permiso de realizar la investigación: "Captura de carbono en acahuales de Calakmul" en la comunidad Valentín Gómez Fariás, la cual tiene como principal objetivo evaluar el efecto de las prácticas de manejo de acahuales en VGF que influyen en los reservorios de carbono.

Agradeciendo y esperando su apoyo. Quedo de usted.

  
**Andrea Venegas Sandoval**  
Estudiante de Maestría  
El Colegio de la Frontera Sur  
ECOSUR Campeche  
avenegas@ecosur.mx

Recibido 08/05/2012  
  
**Juan Manuel Herrera Gloria**  
Comisario Ejidal  
Valentín Gómez Fariás  
Campeche



San Francisco Campeche, a 7 de mayo de 2012

**Asunto:** Solicitud de permiso para trabajar en acahuales de Catakmul

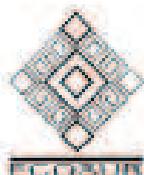
**José Vidal Rejón Tuté**  
**Ejidatario de Zoh Laguna**

**P.R.E.S.E.N.T.E**

Me dirijo a usted para solicitarle permiso de realizar la investigación de tesis: "Captura de carbono en acahuales de Catakmul" en su parcela ubicada en Zoh Laguna. El principal objetivo de la investigación consiste en evaluar el efecto de las prácticas de manejo de acahuales que influyen en los reservorios de carbono, para lo cual se realizarán mediciones de los árboles tanto de su perímetro como de su altura, así como se coleccionará suelo, hojarasca y herbáceas en cuatro sitios de la parcela con una dimensión de 1 m<sup>2</sup>. Los resultados obtenidos de las mediciones servirán para calcular la cantidad de carbono contenido en cada reservorio (suelo, biomasa (árboles, raíces, herbáceas), materia orgánica muerta (hojarasca, ramas y troncos caídos).

Agradeciendo y esperando su apoyo. Quedo de usted.

**Andrea Venegas Sandoval**  
Estudiante de Maestría  
El Colegio de la Frontera Sur  
ECOSUR Campeche  
avenegas@ecosur.mx



San Francisco Campeche, a 7 de mayo de 2012

**Asunto:** Solicitud de permiso para trabajar en acahuales de Calakmul

**Aurelio López Soto**  
**Ejidatario de Valentín Gómez Farias**

**PRESENTE**

Me dirijo a usted para solicitarle permiso de realizar la investigación de tesis: "Captura de carbono en acahuales de Calakmul" en su parcela ubicada en Valentín Gómez Farias. El principal objetivo de la investigación consiste en evaluar el efecto de las prácticas de manejo de acahuales que influyen en los reservorios de carbono, para lo cual se realizarán mediciones de los árboles tanto de su perímetro como de su altura, así como se colectará suelo, hojarasca y herbáceas en cuatro sitios de la parcela con una dimensión de 1 m<sup>2</sup>. Los resultados obtenidos de las mediciones servirán para calcular la cantidad de carbono contenido en cada reservorio (suelo, biomasa (árboles, raíces, herbáceas), materia orgánica muerta (hojarasca, ramas y troncos caídos).

Agradeciendo y esperando su apoyo. Quedo de usted.

*Recibí.*  
*10 Mayo 2012*  
*[Firma]*

  
**Andrea Venegas Sandoval**  
Estudiante de Maestría  
El Colegio de la Frontera Sur  
ECOSUR Campeche  
avenegas@ecosur.mx

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acopa D, Boege E. (1999). "Las Selvas mayas en el sur de Campeche, México: Experiencias en la construcción de la forestería social en Calakmul". En Primack R, Bray D, Galletti H, Ponciano I. *La Selva Maya: Conservación y desarrollo*. Siglo XXI Editores. México.
- Albrecht A, Kandji S. (2003). "Carbon sequestration in tropical agroforestry systems". *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol: 99, pp. 15–27.
- Bass S., Dubois, O., Moura Costa, P., Pinard, M., Tipper, R. and Wilson, C. (2000). Rural livelihoods and carbon management, IIED Natural Resource Issues Paper No.1. International Institute for Environment and Development, London.
- Bray, D. B., E. Duran, V. H. Ramos, J.-F. Mas, A. Velazquez, R. B. McNab, D. Barry, and J. Radachowsky. (2008). "Tropical deforestation, community forests, and protected areas in the Maya Forest". *Ecology and Society*, 13(2): 56
- Brown S, Swingland I, Hanbury-Tenison R, Prance G, Myers N. (2002). "Changes in the Use and Management of Forests for Abating Carbon Emissions: Issues and Challenges under the Kyoto Protocol". *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 360, No. 1797, Carbon, Biodiversity, Conservation and Income: An Analysis of a Free-Market Approach to Land-Use Change and Forestry in Developing and Developed Countries. pp 1593-1605.
- Burton A., Pregitzer K. (2008). "Measuring Forest Floor, Mineral Soil and Root Carbon stocks". En Hoover (ed.) *Field Measurements for Forest Carbon Monitoring*, Springer Science. pp. 129-142
- Cairns M, Garrity D.P. (1999). "Improving shifting cultivation in Southeast Asia by building on indigenous fallow management strategies". *Agroforestry Systems*, Vol 47, pp. 37-48.
- Canadell J, Raupach M. (2008). "Managing Forests for Climate Change Mitigation". *Science* Vol. 320, pp.1456-1457.
- Chazdon R, Harvey C, Komar O, Griffith D, Ferguson B, Martínez-Ramos M, Morales H, Nigh R, Soto-Pinto L, van Breugel M, Philpott S. (2008). "Beyond Reserves: A research agenda for conserving biodiversity in human-modified tropical landscapes". *Biotropica*.
- De Jong B, Ruíz Díaz M. (1997). "La Investigación Forestal y su Contribución al Manejo de los Bosques". En Parra- Vázquez M, Díaz-Hernández B. *Los Altos de Chiapas: Agricultura y Crisis Rural. Tomo. Los Recursos Naturales*. ECOSUR. México. 192 pp.

- Dixon, R. K., Brown S., Houghton R. A, Solomon A. M., Trexler M. C., Wisniewski J.(1994). "Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems". *Science*, New Series, Vol. 263, No. 5144 (Jan. 14, 1994), pp. 185-190
- Eccardi F. 2008. Biodiversidad y consumo responsable. Corredor Biológico Mesoamericano- México; CONABIO; Semarnat; Fomento ecológico Banamex; Gaia Editores, México, 112 pp.
- Foley, J. A., DeFries R, Asner G, Barford C, Bonan G, Carpenter S, Chapin S, Coe M, Daily G, Gibbs H., Helkowski J, Holloway T, Howard E, Kucharik C, Monfreda C, Patz J, Prentice C, Ramankutty N, Snyder P.(2005). "Global Consequences of Land Use". *Science*, Vol 309, pp. 570-574.
- Guariguata M.R. (1999). "Early response of selected tree species to liberation thinning in a young secondary forest in Northeastern Costa Rica". *Forest Ecology Management*, Vol:124, pp.255-261.
- Hughes R, Kauffman B, Jaramillo V. (1999). "Biomass, carbon, and nutrient dynamics of secondary forests in a humid tropical region of Mexico". *Ecology*. 80 (6) 1892-1907.
- IPCC. (2001). Tercer informe de Evaluación: Cambio Climático 2001: La base científica.
- Kass D. (1998). "Barbechos mejorados Capítulo 10". En Jiménez F, Vargas A (Editores). *Apuntes de clase del curso corto: Sistemas Agroforestales*. CATIE/ GTZ. Turrialba, Costa Rica. pp. 239 – 256
- Kepleis P. 2004. Forest Extraction to Theme Parks: The Modern History of Land Change. En: Turner B, Geghegan J, Foster D. 2004. Integrated Land-Change Science and Tropical Deforestation in the Southern Yucatan. Final Frontiers. Oxford University Press. United States.
- Kotto-Same J, Woome P, Appolinaire M, Louis Z. 1997. Carbon dynamics in slash-and-bum agriculture and land use alternatives of the humid forest zone in Cameroon. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 65, pp. 245-256
- Lal R. (2005). Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Manangement*. 220, pp. 242–258
- Malhi Y. (2002). "Carbon in the Atmosphere and Terrestrial Biosphere in the 21st Century". *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 360, No. 1801, Astronomy and Earth Science. pp. 2925-2945.
- Nair R. (1993). *An Introduction to Agroforestry*. Kluwer Academic Publishers. ICRAF. Netherlands. pp.499

- Ojima D, Kittel T, Rosswall T, Walker B. (2001). "Critical Issues for Understanding Global Change Effects on Terrestrial Ecosystems". *Ecological Applications*, Vol. 1, No 3, pp.316-325
- Orihuela-Belmonte D.E., B.H.J. de Jong, J. Mendoza-Vega, J. Van der Wal, Paz-Pellat, Soto-Pinto L, Flamenco-Sandoval A. 2013. Carbon stocks and accumulation rates in tropical secondary forests at the scale of community, landscape and forest type, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 171, 1, pp. 72-84
- Parker C, Mitchell A, Trivedi M, Mardas N. (2009). *El Pequeño Libro de REDD: Una guía de propuestas gubernamentales y no gubernamentales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero producto de la deforestación y la degradación ambiental*. Global Canopy Programme. [www.theredddesk.org](http://www.theredddesk.org).
- Roncal-García S, Soto-Pinto L, Castellanos-Albores J, Ramírez-Marcial N, de Jong B. (2008). "Sistemas Agroforestales y almacenamiento de carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México". *Interciencia*. 33 (3): pp.200-206.
- Schroeder, P. (1991). "Can Intensive Management Increase Carbon Storage in Forests?". *Environmental Management* Vol. 15, No. 4, pp.475-481
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2009) "México, Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático". SEMARNAT. México.
- Shang C., H Tiessen. (2003). "Soil organic C sequestration and stabilization in karstic soils of Yucatán". *Biogeochemistry* 62: 177-196.
- Six, J.R.T. Conant, E. A. Paul, K. Paustian. (2002). "Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils". *Plant and Soil* 241: pp. 155-176.
- Soto-Pinto L, G Jiménez Ferrer, Lerner Martínez T. (2008). *Diseño de sistemas agroforestales para la producción y la conservación: Experiencia y tradición en Chiapas*. ECOSUR. México. pp. 90
- Soto-Pinto L, Anzueto M, Mendoza J, Jiménez Ferrer G, de Jong B. (2010). "Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico". *Agroforest Syst*. 78:39-51.
- Tschakert P, Coomes O, Potvi C. (2007). "Indigenous livelihoods, slash-and-burn agriculture, and carbon stocks in Eastern Panama". *Ecological economics* 60: pp. 807 – 820

- Vargas R, Allen E, Allen M. (2009). Effects of Vegetation Thinning on Above- and Belowground Carbon in a Seasonally Dry Tropical Forest in Mexico. *Biotropica* 41(3) pp.302–311
- Wang W, Wei X, Liao W, Blanco J, Liu Y, Liu S, Liu G, Zhang L, Guo X, Guo S. (2012). Evaluation of the effects of forest management strategies on carbon sequestration in evergreen broad-leaved (*Phoebe bournei*) plantation forests using FORECAST ecosystem model. Artículo en prensa