

**ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN UN SISTEMA
SILVOPASTORIL INTENSIVO EN YUCATÁN,
MÉXICO**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL
GRADO DE**

MAESTRA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS

POR:

**Licenciada en Agroecología
Magdalena Gallegos Pérez**

Directores:

Dr. Francisco Javier Solorio Sánchez

Dr. Juan Carlos Kú Vera

Mérida, Yuc., México, Agosto de 2017



**POSGRADO INSTITUCIONAL EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
MANEJO DE RECURSOS NATURALES TROPICALES**

**ALUMNA: LICENCIADA EN AGROECOLOGÍA
MAGDALENA GALLEGOS PÉREZ**

SÍNODO DEL EXAMEN DE TESIS DE GRADO

DR. JUAN JIMÉNEZ OSORNIO

CCBA-UADY

DR. CARLOS AGUILAR PÉREZ

CCBA- UADY

DR. VÍCTOR PARRA TABLA

CCBA-UADY

DR. ARTURO CAAMAL MALDONADO

CCBA-UADY

MÉRIDA, YUCATÁN, AGOSTO DEL 2017

DECLARATORIA DE ORIGINALIDAD

“El presente trabajo no ha sido aceptado o empleado para el otorgamiento de título o grado diferente o adicional al actual. La tesis es resultado de las investigaciones del autor, excepto donde se indican las fuentes de información consultadas. El autor otorga su consentimiento a la UADY para la reproducción del documento con el fin del intercambio bibliotecario siempre y cuando se indique la fuente”.

DEDICATORIA

A mis padres, Elvira Pérez Alvarado y Claudio Gallegos Falconi por todo el apoyo incondicional, comprensión y confianza, son mi fuerza en los momentos más difíciles, les estoy infinitamente agradecida.

A mi abuela Neri Falconi Vera por motivarme cada día y por sus sabios consejos.

A mis familiares por estar siempre que los necesito.

A mis amigos, aquellos que hacen mi vida más placentera. Gracias!!

AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado Institucional en Ciencias Agropecuarias del Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias por la realización de los estudios de maestría.

A mis asesores: Dr. Javier Solorio Sánchez y Dr. Juan Kú Vera por su apoyo y consejos para la realización de esta tesis.

A los integrantes del sínodo: Dr. Juan Jiménez Osornio, Dr. Carlos Aguilar Pérez, Dr. Víctor Parra Tabla, Dr. Carlos Cervera Herrera y Dr. Arturo Caamal Maldonado por sus revisiones y sugerencias. Gracias!

Al Dr. Fernando Casanova Lugo por los consejos y tiempo que me brindó para la tesis.

A los trabajadores y amigos que me apoyaron en los muestreos.

Al Dr. Javier Solorio Sánchez y Dr. Baldomero Solorio Sánchez por las facilidades para la realización de esta tesis en el Rancho Kampepén.

RESUMEN

El estudio se realizó en Yucatán, México durante la época de lluvias (julio-Diciembre del 2015) con el objetivo de determinar la captura de carbono en un sistema silvopastoril intensivo (SSPi) conformado por *Leucaena leucocephala* asociado a *Panicum maximum* comparado con un monocultivo de *Panicum maximum* en Yucatán, México. En cada sistema se utilizaron 3 parcelas de muestreo (17 x 150 m) en un diseño completamente al azar. Se estimó la biomasa aérea y subterránea de cada sistema, el contenido de carbono en la biomasa aérea y subterránea, la fracción de carbono en biomasa, fracción de carbono en suelo en 3 diferentes profundidades (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm) y el almacenamiento de C total por sistema. El sistema SSPi obtuvo la mayor biomasa total (4580 Kg MS ha⁻¹) comparada con el monocultivo (3650 Kg MS ha⁻¹). El carbono orgánico en la biomasa fue similar en ambos sistemas, obteniendo 109.17 Mg C ha⁻¹ para el SSPi y 105.69 Mg C ha⁻¹ para el monocultivo. Por otra parte, la fracción de carbono y el carbono orgánico del suelo fue mayor en la profundidad de 0-10 cm., para la fracción de carbono, el SSPi obtuvo 12.13 % y para el monocultivo 10.62%. El carbono orgánico del sistema SSPi fue de 54.29 Mg ha⁻¹ y 40.70 Mg ha⁻¹ para el monocultivo. Finalmente, el carbono acumulado en ambos sistemas fue similar; de 347.48 Mg C ha⁻¹ para el SSPi y 227.33 Mg C ha⁻¹ para el monocultivo. Se concluye que los sistemas silvopastoriles tienden a incrementar la producción de biomasa total, así mismo, el contenido de carbono en los dos sistemas está influenciado por el tipo de sistema establecido y la edad de la plantación.

SUMMARY

The study was carried out in Yucatan Mexico, during rainy season (July to December 2015). The aim was to determine the potential of intensive silvopastoral systems (iSPS) of *Leucaena leucocephala* associated with *Panicum maximum* and a grass monoculture system in terms of carbon storage. In each system, three plots (17 x 150 m) were delimited using a completely randomized design. Above and below ground, the carbon storage in biomass, carbon storage in soil was extracted from 0-10 cm, 10-20 cm and 20-30cm; the fraction of carbon and total carbon storage were measured. The iSPS had greater total biomass 4580 kg DM ha⁻¹ compared with 3650 kg DM ha⁻¹ monoculture. The carbon organic biomass was similar between systems, 109.17 Mg C ha⁻¹ to iSPS and 105.69 Mg C ha⁻¹ for monoculture. Furthermore, the fraction of carbon and organic carbon soil was stored at a depth of 0-10 cm; for fraction organic carbon in the iSPS was 12.13 % compared with monoculture 10.62%. The organic carbon soil was 54.29 Mg ha⁻¹ followed by monoculture 40.70 Mg ha⁻¹. Finally, the iSPS and the monoculture was similar, to iSPS 347.48 and 227.33 Mg C ha⁻¹ for monoculture.

Keywords: Greenhouse effect, Silvopastoral systems, Carbon storage

INDICE

CAPITULO I

I. INTRODUCCIÓN	1
------------------------------	----------

CAPITULO II

II. REVISIÓN DE LITERATURA	1
---	----------

2.1 Principales actividades agropecuarias a nivel mundial	3
---	---

2.1.1 Impacto de las actividades agropecuarias en el trópico.....	4
---	---

2.2. Vegetación degradada en México.....	4
--	---

2.3 Vegetación degradada en Yucatán	6
---	---

2.4 Principales emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en Yucatán	7
---	---

2.5 Importancia del Carbono en los organismos	8
---	---

2.5.1 Captura de Carbono	9
--------------------------------	---

2.5.2 Suelos como sumideros de carbono.....	10
---	----

2.6 Componentes de los Sistemas agroforestales	11
--	----

2.7 Sistemas silvopastoriles.....	12
-----------------------------------	----

2.8 Características de las especies a evaluar en el sistema silvopastoril.	13
---	----

2.8.1 <i>L. leucocephala</i> var Cunningham (CIAT 17502).....	14
--	----

2.8.2 <i>P. maximum</i> vr Tanzania (Morado, TD 58)	15
---	----

III. OBJETIVOS.....	17
----------------------------	-----------

3.1 Objetivo general	17
----------------------------	----

3.2 Objetivos específicos	17
---------------------------------	----

IV. Bibliografía.....	18
-----------------------	----

CAPITULO IV

Artículo científico

ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN UN SISTEMA SILVOPASTORIL INTENSIVO EN YUCATAN, MEXICO	26
---	----

INTRODUCCIÓN	28
---------------------------	-----------

MATERIALES Y MÉTODOS	29
-----------------------------------	-----------

Muestras de biomasa	30
Fración de carbono en biomasa aérea y subterránea.....	31
Carbono orgánico del suelo (COS).....	31
Almacenamiento de C	32
RESULTADOS	32
Rendimiento de biomasa aérea y subterránea.....	32
Carbono orgánico de biomasa	33
Fración de carbono.....	34
Carbono orgánico de suelo	34
Carbono almacenado total	35
DISCUSIÓN	35
Rendimiento de Biomasa aérea y subterránea.....	35
Carbono orgánico de biomasa.....	35
Fración de carbono.....	36
Carbono orgánico del suelo	37
Carbono almacenado total	37
CONCLUSIONES	39
Agradecimientos.....	35
Referencias	40

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vegetación natural y por ecosistema transformada en México de 1976-2011. ...	5
Figura 2. Cambios en el uso del suelo en Yucatán del 2001 al 2004 por la ganadería.....	7
Figura 3. Esquema representativo del diseño experimental en Kampepén, Yucatán.....	30
Figura 4. Carbono promedio almacenado en un sistema silvopastoril intensivo y un monocultivo en Kampepén, Yucatán.....	35

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tasa de cambio de la vegetación natural por entidad federativa, 2007-2011	6
Cuadro 2. Cambios de uso de suelo en México por tipo de vegetación para el año 2009 ..	12
Tabla 1. Biomasa aérea y subterránea en un sistema silvopastoril y en un monocultivo de pasto en Kampepén, Yucatán.....	33
Tabla 2. Carbono orgánico en biomasa aérea y subterránea de <i>P. maximum</i> en un sistema silvopastoril intensivo y en monocultivo en Kampepén, Yucatán.....	33
Tabla 3. Fracción de carbono a tres profundidades de suelo en un sistema silvopastoril y en un monocultivo de pasto en Kampepén, Yucatán	34
Tabla 4. Carbono orgánico en el suelo a diferentes profundidades en un sistema silvopastoril intensivo y un monocultivo en Kampepén, Yucatán.....	34

I. INTRODUCCIÓN

En los trópicos la agricultura y ganadería son actividades que se han incrementado en los últimos años para sostener el aumento de la población (Vermeulen *et al.*, 2012).

Estas se caracterizan por el empleo de monocultivo de gramíneas de baja calidad nutricional en época de secas (Barahona *et al.*, 2014) debido a factores climáticos, edáficos y a características genéticas de las especies (Kú –vera *et al.*, 2013).

Este sistema de producción intensivo es causante de cambios en el uso del suelo, provocando erosión y emisión de gases asociados al calentamiento global entre otros (Godfray *et al.*, 2010). De estos gases generados, el CO₂ cobra importancia por su efecto sobre las condiciones climáticas del planeta, debido a que es un gas de larga permanencia, durando de 5 a 200 años en la atmósfera. Se estima que del CO₂ emitido, el 50% tardará 30 años en desaparecer, un 30% permanecerá varios siglos y el 20% restante durará varios millares de años (Solomon *et al.*, 2007). En Yucatán se estima que el 30% de la cobertura vegetal se ha perdido para la incorporación de monocultivos, provocando emisiones de 1774.25 Gg de CO₂. Una de las opciones para reducir las concentraciones de CO₂ en la atmósfera es su almacenamiento en la biomasa aérea y en el suelo. Se estima que la mayor acumulación de carbono ocurre en el suelo almacenándose un 60% en comparación con la biomasa aérea. Es por esto que las reservas de carbono orgánico tanto en los suelos como la parte aérea tiene un efecto determinante al disminuir los niveles de CO₂ en la atmosfera. Ante tal situación, los sistemas Silvopastoriles intensivos (SSPi), tienen mayor potencial para la captura de CO₂ que las pasturas convencionales (Nair *et al.*, 2010), debido a que crean un microclima favorable en los sistemas mejorando la productividad e incrementando de esta manera los depósitos de carbono en el suelo y vegetación leñosa contribuyendo a la mitigación del cambio climático (Cubbage *et al.*, 2013). El SSPi incluye varios estratos que combinan arbustos forrajeros y pastos tropicales los cuales reducen los efectos de la deforestación y degradación de los pastizales. Entre los Arbustos forrajeros se encuentra la especie Leucaena (*Leucaena leucocephala*), Ramón (*Brossimum alicastrum*), Matarratón (*Gliricidia sepium*) y Botón de oro (*Tithonia diversifolia*) entre otros (Montagnini *et al.* 2015) En los trópicos se ha incorporado a la especie Leucaena (*L. leucocephala*) como

forrajera por su calidad nutricional, capacidad de fijación de nitrógeno atmosférico y tolerancia a la sequía, además de una alta producción de biomasa, representando una importante alternativa para la captura de carbono en medios estables (Anguiano *et al.*, 2013). Estudios reportan que la inclusión de plantas de *L. leucocephala* en los sistemas silvopastoriles pueden lograr el secuestro de carbono, especialmente si es establecida en altas densidades y con estabilidad en el tiempo (Hernández *et al.*, 2008). Al respecto, Anguiano *et al.*, (2013) en Colima reportó mejores resultados para el tratamiento de 80 mil árboles de *L. leucocephala*, con un secuestro total en biomasa aérea de 101.7 t C ha⁻¹.

Para el estado de Yucatán Casanova *et al.*, (2010) reportaron que el carbono total acumulado en un sistema agroforestal con *L.leucocephala* fue de 19.5 t C ha⁻¹. Ante tales resultados, se ha demostrado que la combinación de gramíneas mejoradas y árboles, representan una de las mayores contribuciones para disminuir las afectaciones del cambio climático. Sin embargo existe poca información sobre el potencial de almacenamiento de carbono en la biomasa aérea y subterránea en sistemas silvopastoriles en el sureste del país por lo que el objetivo de este trabajo fue determinar el almacenamiento de carbono en Yucatán, México.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Principales actividades agropecuarias a nivel mundial

Se estima que la población mundial pasará de 7200 millones a 9600 millones en 2050. Este cambio se debe principalmente al aumento de la población, la urbanización y el consumo de proteínas animales en la dieta. Es por ello que a nivel mundial, la ganadería ha sido utilizada como una fuente de ingresos, proveyendo alimentos de calidad, animales de tiro y fertilizantes que contribuyen a la subsistencia de los hogares (Puricelli, 2011) disminuyendo de esta manera el uso de insumos externos.

Para el año 2013, se estima que la producción de carnes a nivel mundial aumentó más de 100 millones de toneladas. La carne de cerdo representó cerca de 109 millones de toneladas en China, la Unión Europea y Estados Unidos con el 70% de la producción mundial; la carne de pollo tuvo una producción de 84 millones, liderada por China, Estados Unidos y Brasil y la carne vacuna alcanzó unos 58 millones de toneladas principalmente en Estados Unidos, Brasil, India, China y la Unión Europea (Errecat y Sosa, 2013).

En Latinoamérica, la producción bovina de doble propósito es una de las principales actividades del sector debido a la disponibilidad y utilización de sus recursos naturales. Brasil, Argentina y México tuvieron el mayor número de cabezas de ganado. En el 2011, Brasil poseía el mayor número de ganado de la región, con 213 millones de cabezas. Argentina, tuvo el segundo lugar más alto (48 millones) y México alcanzó el tercer lugar con 39 millones de cabezas de ganado. En el Caribe, República Dominicana tuvo el mayor número de vacas, cerdos y pollos, mientras que Cuba tuvo el mayor número de ovejas y cabras (FAO, 2014).

En México existen ganado vacuno lechero, cárnico y de doble propósito, que está representado por cerca de 30 razas o cruza de bovinos. Existen alrededor de 34 millones de cabezas de ganado, de las cuales 19% corresponde a ganado productor de leche y el 67% lo representa el sistema bovino de doble propósito (Puricelli, 2011).

2.1.1 Impacto de las actividades agropecuarias en el trópico

En América Latina y el Caribe, la producción de carne bovina es una de las principales actividades para atender las demandas crecientes de alimento en el mundo (FAO 2008). El forraje es el alimento más consumido por el ganado, representando el 48% de toda la biomasa consumida; de esta, 1.1 Gt se utilizan en sistemas mixtos y 0.6 Gt en los sistemas de pastoreo solamente (Herrero *et al.*, 2013).

Sin embargo, debido a la explotación de estos sistemas, estudios recientes indican incrementos en las tasas de deforestación, acompañados de procesos de degradación de suelos, fragmentación de paisajes y pérdida de biodiversidad (Rivero-Romero *et al.*, 2016).

Se estima que en México de los 3,900 millones de hectáreas, 500 millones están cultivadas de forma intensiva, 1,400 millones son pastizales de productividad relativamente alta y los restantes 2,000 millones de hectáreas son pastizales extensivos de productividad relativamente baja (Pérez, 2008). La ganadería constituye el principal uso del suelo en el país, desarrollándose en una superficie de 113.8 millones de hectáreas, lo que representa 58% del territorio nacional (Sagarpa, 2012).

2.2. Vegetación degradada en México

Para el año 2011, México había transformado alrededor de 55.9 millones de hectáreas de vegetación natural a otros usos del suelo (Figura 1). Los tipos de vegetación que habían perdido mayor superficie hasta esa fecha fueron las selvas (23.4 millones de ha), seguidas por pastos naturales (6.5 millones), bosques templados (13 millones) y los matorrales (5.8 millones) (INEGI, 2013).

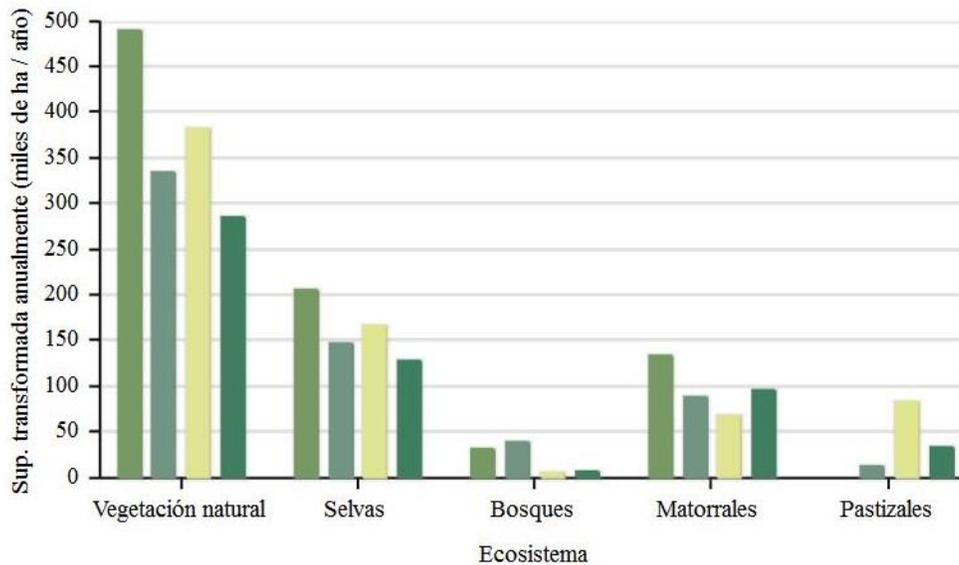


Figura 1. Vegetación natural y por ecosistema transformada a otros usos del suelo en México de 1976-2011 (INEGI, 2013).

A nivel nacional, se estima que las entidades federativas para el periodo 2007 y 2011 que perdieron rápidamente su vegetación natural fueron: Tamaulipas y Chiapas (cada una perdió 0.54% de su superficie de vegetación natural remanente anualmente), Nuevo León y Sinaloa perdieron el 0.49%, Yucatán con 0.44% y el estado de México el 0.41%. Cuadro 1 (INEGI, 2013).

Cuadro 1. Tasa de cambio de la vegetación natural por entidad federativa en México, de 2007-2011

(superficie en hectáreas y tasa de cambio anual en porcentaje)

ENTIDAD	SUPERFICIE		TASA DE CAMBIO ANUAL
	2007	2011	
Tamaulipas	3 841 056	3 759 097	-0.54
Chiapas	3 840 454	3 758 572	-0.54
Nuevo León	4 301 275	4 218 264	-0.49
Sinaloa	3 219 955	3 157 937	-0.49
Yucatán	2 846 263	2 796 633	-0.44
Estado de México	778 992	766 294	-0.41

Fuente: INEGI, 2013

2.3 Vegetación degradada en Yucatán

A nivel regional, en Yucatán, la selva baja caducifolia y la selva mediana caducifolia son los tipos de vegetación más fragmentados (Acosta-Lugo *et al*, 2010). Aproximadamente el 30% de cobertura vegetal se ha perdido por el desmonte de grandes extensiones de selvas para destinarlas a la ganadería extensiva y la agricultura de roza, tumba y quema (CONABIO, 2006).

De la superficie total, 758 027 ha en el 2001 y 845 986 ha en 2004 se dedicaron a la ganadería, mostrando un incremento del 19% al 21%. Este aumento estuvo relacionado con el cambio del uso del suelo para desmontar y habilitar 87 959 ha para la actividad ganadera (Chauvet, 1999). La superficie ganadera se presenta en tres tipos: a) superficie natural que está formado por monte y hubché, la cual tuvo una reducción de 150,889 ha de 2001 a 2004; b) superficie con pasto que aumentó 498, 740 ha y cuya composición florística está representada por gramíneas introducidas (Figura 2), entre las que se encuentran el pasto Taiwan (*Pennisetum purpureum*), Guinea (*Panicum maximum*), Estrella de África (*Cynodon nlemfuensis*), Brizantha (*Brachiria brizantha*) y Tanzania (*Panicum maximum*

var. Tanzania) y c) superficie de 2, 598 937 que en el 2004 estaba incluida en la superficie del pasto (SAGARPA, 2004).

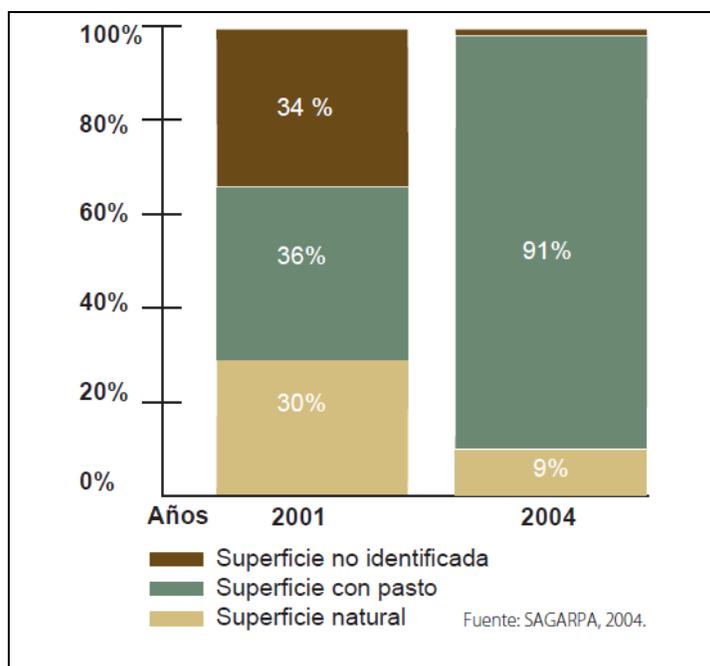


Figura 2. Cambio de uso de suelo por pastos cultivados en Yucatán para la ganadería del 2001 al 2004 (SAGARPA, 2004)

2.4 Principales emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel global

Herrero *et al.*, (2011), estima que la ganadería a nivel global emite 14 – 18% de emisiones de gases de efecto invernadero. En adición, el 17% de las emisiones son atribuidas al cambio de uso del suelo relacionado con la agricultura y monocultivo de pastos (IPCC, 2007). Las emisiones provenientes de los sistemas de cría doméstica se deben a la gran cantidad de sólidos volátiles y excreciones de nitrógeno por kilogramo de carne producida. A nivel mundial, la carne de vacuno contribuye con 2.9 giga toneladas de CO₂ equivalente al 41% del sector, mientras que la leche de vaca lo hace con 1.4 giga toneladas, que representa el 20%. Le siguen la carne de cerdo con 0.7 giga toneladas de CO₂ equivalente al 9 %, la carne de pollo y huevos (8 %) y la leche y carne de los pequeños rumiantes al 6% (Gerber *et al.*, 2013).

En el estado de Yucatán, de acuerdo a las actividades agropecuarias con las que cuenta, se considera que existen dos actividades como fuentes importantes de emisiones de GEI: explotación del ganado doméstico (bovino, porcino, caprino, ovino y ave de corral) y suelos agrícolas (uso de fertilizante, principalmente). Se considera que estas dos fuentes reportadas emiten principalmente metano (CH_4), producto de la fermentación entérica y también óxido nitroso (N_2O) resultado del manejo del estiércol y labores agrícolas (IEEGEI, 2005).

Se estimó que el Estado, emite en promedio un total de 1774.25 Gigatoneladas (Gg) de CO_2 equivalente/año dentro de un periodo evaluado de diez años (2001-2010), para las dos actividades del sector agrícola. En el año 2005, específicamente, el total de GEI emitido fue de 1844.8 Gg de CO_2 , del cual, 1066.70 de CO_2 es emitido por la actividad pecuaria y 778.10 es emitido por suelos agrícolas (SEDUMA, 2010).

2.5 Importancia del Carbono en los organismos

El carbono (C) es un elemento fundamental de los compuestos orgánicos, que se combina con nitrógeno, fósforo, azufre, oxígeno e hidrógeno, para constituir las moléculas más importantes para la vida. Es de gran importancia para la regulación del clima, y en él se ven implicadas actividades básicas para el sostenimiento de la vida. Este ciclo comprende dos cursos que se suceden a distintas velocidades: el ciclo biológico y el ciclo biogeoquímico; el primero comprende los intercambios de C en forma de CO_2 entre los seres vivos y la atmósfera (fotosíntesis), sucede relativamente rápido, estimándose que la renovación del C atmosférico se produce cada 20 años, el segundo regula la transferencia de C entre la atmósfera y la litosfera (océanos y suelo) (Sierra, 2011).

El carbono se almacena en nuestro planeta en los siguientes sumideros principales (a) en forma de moléculas orgánicas en la vida y los organismos muertos que se encuentran en la biosfera; (b) como el dióxido de carbono gas en la atmósfera; (c) como materia orgánica en los suelos; (d) en la litosfera como combustibles fósiles y depósitos de rocas sedimentarias como la piedra caliza, dolomita y tiza; y (e) en los océanos como el dióxido de carbono

atmosférico disuelto y como conchas de carbonato de calcio en los organismos marinos (Pidwirny, 2012).

Las plantas superiores adquieren el bióxido de carbono (CO₂) atmosférico a través de la fotosíntesis, convirtiendo la energía activa de la luz en forma latente de energía que puede ser almacenada para ser usada cuando se necesite; empleando el dióxido de carbono que está presente en la atmósfera o disuelto en el agua. Al descomponerse el dióxido de carbono, el carbono pasa a ser parte de los tejidos vegetales en forma de hidratos de carbono (glucosa), grasas y proteínas, para que las moléculas orgánicas formen parte de las cadenas de carbono, mientras que el oxígeno es reintegrado a la atmósfera o al agua mediante la respiración (Nair y Nair., 2014).

2.5.1 Captura de carbono

La captura, almacenamiento o secuestro de carbono consiste en fijar el C de la atmósfera, principalmente en forma CO₂ en la fitomasa o vegetación principalmente en tejidos leñosos (Lal *et al.*, 2007).

Se conoce como sumidero todo sistema o proceso por el que se extrae de la atmósfera un gas o gases y se almacena. Las formaciones vegetales actúan como sumideros de C por su función vital principal, la fotosíntesis. Mediante esta función, los vegetales absorben CO₂ que compensa tanto las pérdidas de este gas que se producen por la respiración como las emisiones producidas en otros procesos naturales (descomposición de materia orgánica). (FAO, 2011). La captación de CO₂ por los ecosistemas vegetales terrestres constituye un componente importante en el balance global de Carbono (C). A escala mundial se considera que la biosfera terrestre fija cerca de 2.000.000 toneladas/año (UNESA, 2005).

Los sumideros de carbono en los sistemas terrestres incluyen la biomasa aérea de la planta, conformada por partes específicas como hojas, tallos de árboles, componentes herbáceos y la biomasa subterránea; en la cual están incluidos las raíces, los microorganismos del suelo y las formas orgánicas e inorgánicas del carbono estable. Se estima que el 60% del carbono se encuentra en la parte subterránea y el 40% en la parte aérea (Lal, 2008).

2.5.2 Suelos como sumideros de carbono

El carbono se almacena en los árboles (tronco, ramas, hojas y raíces), hojarasca y los suelos, esto incluye a los descomponedores de la materia orgánica que se alimentan de tejidos muertos y exudados (Pantawat, 2012). El mecanismo de la captura de carbono en el suelo está influenciado por dos actividades principales, la descomposición de la hojarasca, y la actividad de la raíz subterránea (Lema *et al.*, 2007). En los ecosistemas terrestres, el suelo es el principal fuente de reservorio de C, ya que posee una cantidad equivalente a tres veces el carbono almacenado en la vegetación terrestre y aproximadamente dos veces más que el presente en la atmósfera (Lal, 2008).

En las zonas agrícolas las reservas de carbono en el suelo han disminuido por las actividades humanas, debido a una disminución de materia orgánica en la superficie y a la destrucción de macro y micro agregados que forman la estructura del suelo (Trumper *et al.*, 2009). Es por esto que los suelos son la mayor fuente y reservorio de carbono (C) en los ecosistemas terrestres, y son la vía principal por la cual el CO₂ fijado por las plantas es retornado a la atmósfera. Así mismo es determinante de la calidad del suelo debido a que cumple funciones críticas como fuente y almacén de nutrientes y participa en la estabilización de la estructura del suelo y el almacenamiento de agua (Karlen y Andrews, 2000).

La emisión de CO₂ de los suelos a la atmósfera ocurre principalmente por la respiración de raíces y organismos heterótrofos (Palacio y Hurtado, 2008). La descomposición de la materia orgánica del suelo (MOS) es el proceso más importante de producción de CO₂ en el suelo, ya que este gas, se almacena en el espacio poroso del suelo y es liberado posteriormente a la atmósfera mediante un proceso de difusión entre zonas del suelo con diferente concentración (Fuentes *et al.*, 2010). Los suelos en conjunto contienen un estimado de 1.700 Gt (miles de millones de toneladas métricas) a una profundidad de 1 m y como 2.400 Gt a una profundidad de 2 m. Se estima que un adicional de 560 Gt está contenida en la biota terrestre de plantas y animales (Lal, 2014).

La materia orgánica (residuos de plantas y materiales animales) está hecha de compuestos tales como carbohidratos, ligninas y proteínas. Los microorganismos descomponen la materia orgánica en dióxido de carbono y los residuos más resistentes en humus (Palacio y Hurtado, 2008). Esta degradación produce como primera etapa de mineralización productos simples, pero al continuar el proceso, más la acción continua de microorganismos se produce la formación de complejos orgánicos que se llaman sustancias húmicas. Durante la segunda etapa tiene lugar la polimerización de dichos componentes mediante reacciones químicas espontáneas o mediante procesos de autooxidación y oxidación, catalizados por enzimas microbianas (Tortora *et al.*, 2007).

La materia orgánica y el humus aportan muchos nutrientes al suelo, mejoran su estructura, forman fragmentos de arcilla, ayudan a prevenir la erosión y mejoran la capacidad de retención de nutrientes y agua de suelos arenosos o toscos. La cantidad de materia orgánica depende de la vegetación, el clima, la textura del suelo, el drenaje del mismo y de su laboreo. Los microorganismos desempeñan un papel destacado en los cambios geoquímicos y la fertilidad del suelo y realizan ciertas transformaciones esenciales, como la capacidad de llevar a cabo la fotosíntesis y fijar el CO₂ atmosférico. Muchas de estas transformaciones tienen lugar en el suelo, otras en ambientes acuáticos o en la atmósfera (FAO, 2012).

2.6 Componentes de los Sistemas agroforestales

En los ecosistemas terrestres, los bosques juegan un papel importante en el almacenamiento de carbono, (Cuadro 2), así mismo, en los trópicos, se ha utilizado el componente agroforestal para contrarrestar la degradación de los suelos. Los sistemas agroforestales son formas de uso de suelo donde interactúan especies leñosas, con cultivos agrícolas y animales (Chavarria, 2013). Existen estudios que afirman que estos sistemas pueden mantener y aumentar las reservas de carbono, además de los beneficios económicos y ambientales que proporcionan.

La combinación entre los componentes agroforestales dan paso a las siguientes categorías: sistema agrosilvopastoril y sistema silvopastoril. El sistema agrosilvopastoril es un sistema donde se combinan árboles con cultivos agrícolas y pastos para producción animal, en

forma simultánea o en forma secuencial. Se puede combinar con el uso de cortinas rompevientos, árboles en hileras o cercas vivas mientras que el sistema silvopastoril integra pastos para ganado en una misma unidad de tierra, en asociación con árboles para leña, madera, frutos y forraje. El sistema es una producción combinada que busca proporcionar un mayor beneficio al productor empleando prácticas de conservación de suelos con la rotación del ganado (Chavarria, 2013).

Cuadro 2. Cambios de uso de suelo en México por tipo de vegetación para el año 2009.

	Cobertura vegetal	Área forestal (miles ha)	Carbono total (t C año)
Bosques naturales	Bosque de coníferas	2952.80	1,328.76
	Bosque de coníferas secundario	8933.77	402.20
	Bosques de encino primario	1622.1	1597.19
	Bosque de encino secundario	1288.52	552.83
	Selvas		
	Selva caducifolia primaria	202.4	91.08
	Selva caducifolia secundaria	274.97	123.78
	Selva espinosa primaria	18.79	8.46
	Selva espinosa secundaria	31.11	14
	Selva perennifolia primaria	328.76	-
	Selva perennifolia secundaria	612.80	275.76
	Selva subcaducifolia	317.01	142.66
otros	Pastizales	160	38.16
	Manglar	31.7	21.40
	Palmar	10.7	2.41

Fuente: INNEC, 2012

2.7 Sistemas silvopastoriles

Los sistemas silvopastoriles son una opción de alimentación animal, considerados como una herramienta de mitigación y adaptación al cambio climático, contribuyen a generar una gran diversidad de servicios ambientales que en su conjunto mejoran las condiciones ambientales y productivas de los sistemas ganaderos. Se ha demostrado que producen de 2 a 4 veces más carne que el pastoreo extensivo y/o pastos mejorados sin árboles (Murgueitio *et al.*, 2011).

Dentro de los arreglos silvopastoriles, se encuentra el sistema silvopastoril intensivo, el cual utiliza altas densidades de árboles o arbustos (más de 10, 000/ha) en asociación con arbustivos leguminosos (*L. leucocephala*) buscando la máxima producción por unidad de área a través de la incorporación de un estrato arbustivo para ramoneo y en algunos casos un estrato arbóreo multipropósitos (maderables, frutales, sombra) en asocio con gramíneas, además estos sistemas incrementan la biodiversidad comparados con un sistema de producción convencional y reduce la vulnerabilidad a los cambios extremos de clima. (Solorio *et al.*, 2017) Estudios sobre el comportamiento animal de vacas en condiciones tropicales demuestran que se obtienen incrementos hasta de un 10% en la producción de leche, cuando se mejoran las condiciones medioambientales de las vacas en pastoreo (Bacab y Solorio, 2011).

Uno de los atributos de los sistemas silvopastoriles es el incremento de la productividad ganadera a través de la oferta de biomasa forrajera, la carga animal y la producción de carne y/o leche, además se convierte en sumidero de CO₂ y reduce las emisiones de metano por unidad de producto (Murgueitio *et al.*, 2014). La ventaja de estos sistemas radica en que el suelo destinado a ganadería puede sostener una mayor cantidad de biomasa fotosintética que potreros establecidos solamente con pastos, lo cual genera una mayor cantidad de captura de carbono (Peters *et al.*, 2013).

La inclusión de leucaena en los sistemas de producción animal genera una reducción del 20 % en las emisiones de metano por kilo de carne o leche producida en los SSPi (Molina *et al.*, 2016) y se producen menores pérdidas de nitrógeno hacia la atmósfera por el rápido y

eficiente reciclaje de excretas; asimismo se incrementa la fertilidad del suelo, ofreciendo hábitat para organismos controladores biológicos de las plagas de pastos, ectoparásitos del ganado y también para varios grupos funcionales de la biodiversidad como aves, pequeños mamíferos, hormigas, escarabajos estercoleros, lombrices de tierra y otros (Fajardo *et al.*, 2010, Rivera *et al.*, 2013), además se previenen procesos de erosión, por la deposición del follaje y excretas durante el pastoreo y podas, contribuyendo de esta manera a mejorar la estructura del suelo (Rivera *et al.*, 2013).

2.8 Características de las especies a evaluar en el sistema silvopastoril.

2.8.1 *L. leucocephala* var Cunningham (CIAT 17502)

Pertenece a la familia Fabáceae, subfamilia Mimosoidae. Dentro de los principales nombres locales con que se conoce se incluyen los siguientes: Koa haole (Hawai); Leucaena (Australia); Ipil – ipil y Lepile (filipinas); Acacia bella rosa (Colombia); Huaxim (México); vi- vi (Sur de África) (Mejia *et al.*, 2009).

Es un Árbol perenne de 3 a 10 m de altura y raíces pivotantes, aunque algunas variedades maderables alcanzan hasta los 20 m. Hojas compuestas bipinadas de 20 – 40 foliolos lanceolados de 7 – 12 mm y de color verde oscuro; flores axilares en forma de cabezuelas compuestas de color blanco amarillento; vaina casi aplanada que contiene 4 – 6 semillas de color café oscuro, presenta dehiscencia bastante definida. Originario de centro América y de la Península de Yucatán, México (Lizárraga *et al.*, 2001).

Crece en los trópicos húmedos, semihúmedos y sub-trópicos. Su rango de temperatura óptima es de 22- 30 °C, con una mínima de 10 °C precipitación mayor de 750 mm. Se adapta a un rango amplio de suelos con pH 5.5 – 8.0 y no tolera suelos ácidos con pH menor de 5, en donde su desarrollo es muy pobre. Necesita suelos de mediana fertilidad. No tolera sombra ni inundación, pero si tolera la sequía, aunque se desfolia en épocas secas prolongadas. Es la leguminosa arbórea de uso múltiple más cultivada en los trópicos ya que se utiliza como forraje, abono verde, leña, madera, sombra para animales y plantas, protección de suelos y sus vainas son empleadas en la alimentación humana (Lizárraga *et al.*, 2001), el follaje es muy apreciado como complemento alimenticio por su alto contenido

proteína cruda (16 a 25%) teniendo una digestibilidad de 65 a 85%. Produce de 7 a 25 t de MS/ha/año (García *et al.*, 2008).

La densidad de siembra varía según los objetivos del cultivo. Cuando se usa para pastoreo, la distancia entre surcos es de 1.5 a 1.6 m para asegurar una mayor fijación de Nitrógeno en el terreno y cuando las plántulas alcancen de 20 a 25 cm de altura, aproximadamente a las seis semanas de edad. El primer pastoreo se puede hacer cuando la parte leñosa de la leucaena alcance un metro, utilizando animales jóvenes (Solorio y Solorio, 2008). Soporta una carga animal de 3-4 cabezas/ha/año (Xochitl y Solorio, 2012).

2.8.2 *P. maximum* vr Tanzania (Morado, TD 58)

Esta especie pertenece a la Familia Poaceae. Fue introducida a Tailandia desde Costa de Marfil a finales de la década de los 80's y a Brasil en 1990. Este pasto fue aceptado por los agricultores tailandeses porque resultó ser más productivo que el pasto guinea común y producía rendimientos de forraje de buena calidad. También fue fácil producir la semilla, lo que aseguraba su pronta disponibilidad (Guiot, 2001).

Su distribución es en América tropical; registrándose en Campeche, Chiapas, Chihuahua, Coahuila, Colima, Estado de México, Guerrero, Jalisco, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, San Luís Potosí, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán (Villaseñor y Espinosa, 1998).

Es una gramínea de crecimiento erecto con cerca de 1.50 m de altura; hojas decumbes de 2.6 cm de ancho, las láminas y vainas de las hojas no poseen pilosidad o serosidad, los tallos son de color púrpura y las inflorescencias contienen espiguetas sin pilosidad. El contenido de proteína cruda varía de 14-16.2% en hojas (ms) y de 08-9.9% en tallos (ms).

Requiere una precipitación mínima de 800 mm/año, una altitud de 0 a 1600 msnm, una temperatura de 18 a 27° C. Soporta sombra entre un 30 y 50%. Se adapta bien a suelos de mediana a alta fertilidad, responde muy bien a la aplicación de fertilizantes; preferiblemente se debe sembrar en suelos profundos de textura media con pH entre 5 y 7.5; no tolera suelos con alta saturación de aluminio. Tiene buena resistencia al fuego y la

sequía (Torres *et al.*, 2010). Produce 130 ton/ha/año de materia verde y 26 ton materia seca/ha/año. Es un pasto exigente en fósforo y potasio, principalmente en la fase de establecimiento. Este pasto sembrado a una densidad de 2 kg/ha⁻¹ produce cerca de 13, 359 kg/ms/ha⁻¹ de materia en temporada de lluvias desde 3 cortes (Hare *et al.*, 2014).

La época de siembra es durante la estación lluviosa, al voleo o en surcos separados a 60 cm y 20 cm entre plantas, con una profundidad de hasta 2 cm. Al voleo se obtiene una producción de 6 a 8 kg/ha⁻¹. La germinación es de 10 a 20 días después de la siembra, la semilla no debe quedar enterrada a una profundidad superior a 1–2 cm debajo de la superficie. Para el manejo es recomendable iniciar el pastoreo estando con 90 cm de altura; y se retira a una altura de 25 cm.

Soporta una carga animal de 2- 4 cabezas/ha/año en la época lluviosa y en la época seca de 1.5 a 2 cabezas/ha⁻¹. Después de 3- 4 meses de sembrado se necesita hacer un pastoreo leve debido a que sus raíces no son profundas; después de un año, el pastoreo debe ser continuo y rotativo, con un periodo de descanso de 35 a 40 días en verano y 55 días en invierno.

El rendimiento en materia seca aumenta con la edad de la planta, con sus resultados más elevados a los 105 días con (12.7 t ms/ha/corte), mientras que la proporción hoja – tallo, la proteína bruta, la digestibilidad de la materia seca y orgánica y la energía metabolizable disminuye con la edad a los 30 días con (11.62%,63.5, 68.74% y 10.17 Mj) respectivamente, mientras que la fibra aumenta con la edad siendo sus valores más altos a los 105 días con (35.53%) (Verdecia *et al.*, 2008).

III. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

- Evaluar la captura de carbono en la biomasa aérea y subterránea de un sistema silvopastoril intensivo de *Leucaena leucocephala* asociada con pasto guinea (*Panicum maximum*) en Yucatán, México.

3.2 Objetivos específicos

- Evaluar la producción de biomasa aérea y subterránea de un sistema silvopastoril intensivo comparado con un monocultivo de *P. maximum*
- Determinar la fracción de biomasa aérea y subterránea de un sistema silvopastoril intensivo comparado con un monocultivo de *P. maximum*
- Cuantificar la fracción de carbono orgánico del suelo en un sistema silvopastoril y un monocultivo de *P. maximum*
- Cuantificar el almacenamiento de carbono total en un sistema silvopastoril intensivo y un monocultivo de *P. maximum*

IV. HIPÓTESIS

El sistema silvopastoril intensivo basado en *L. leucocephala* asociado a pasto guinea (*P. maximum*) acumula una mayor cantidad de carbono en biomasa aérea y subterránea comparado con sistemas tradicionales ganaderos basados en pasturas de monocultivo de *P. maximum*.

IV. BIBLIOGRAFIA

- Acosta-Lugo, E., Alonzo-Parra, D., Andrade-Hernández, M., Castillo-Tazab, D., Chablé-Santos, J., Durán, R., Espadas-Manrique, C., Fernández-Stohanzlova, I., Fraga, J., Galicia, E., González-Iturbe, J.A., Herrera-Silveira, J., Sosa-Escalante, J., Villalobos-zapata, G.J., y Tun-Dzul, F. 2010. Plan de Conservación de la Eco-región Petenes-Celestún-Palmar. Universidad Autónoma de Campeche. Pronatura Península de Yucatán. 177 pp.
- Anguiano, J. M., Aguirre, J. y Palma, J. M. 2013. Establecimiento de *Leucaena leucocephala* con alta densidad de siembra bajo cocotero (*Cocos nucifera*). Revista Cubana de Ciencia Agrícola 46: 103-107.
- Bacab, H. M. y Solorio F.J. 2011. Oferta y consumo de forraje y producción de leche en ganado de doble propósito manejado en sistemas silvopastoriles en Tepalcatepec, Michoacán. Tropical and Subtropical Agroecosystems 13(3): 271-278.
- Barahona, R; Sánchez, MS; Murgueitio, E; Chará, J. 2014. Contribución de la *Leucaena leucocephala* Lam (de Wit) a la oferta y digestibilidad de nutrientes y las emisiones de metano entérico en bovinos pastoreando en sistemas silvopastoriles intensivos. En: Premio Nacional de Ganadería José Raimundo Sojo Zambrano, modalidad Investigación Científica. Bogotá, Colombia, Revista Carta Fedegan 140:66-69.
- Casanova, L.F., Caamal, M.J.A., Petit, A.J, Solorio, S. F., Castillo, C.J. 2010. Acumulación de carbono en la biomasa de *Leucaena leucocephala* y *Guazuma ulmifolia* asociadas y en monocultivo. Revista Forestal Venezolana, 54(1): 45-50.
- Chauvet, M. 1999. La ganadería bovina de carne en México: del auge a la crisis. México: Universidad Autónoma de México.
- Chavarría, U. A. 2013. Guía Técnica SAF para la implementación de sistemas agroforestales (SAF) con árboles maderables forestales. Costa Rica. 30 p.
- CONABIO, 2006. Capital natural y bienestar social. Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F. 70p.

- Cubbage, F., Balmelli, G., Bussoni, A., Noellemeyer, E., Pachas, A. N., Fassola, H., Colcombet, L., Rossner, B., Frey, G., Dube, F., De Silva, M. L., Stevenson, H., Hamilton, J., Hubbard, W. 2013. Comparing silvopastoral systems and prospects in eight regions of the world. *Agroforestry Systems*, 86:303–314. doi:10.1007/s10457-012-9582-z.
- Errecat, V., Sosa, M. 2013. Análisis del Mercado mundial de carnes. CERE: Escuela de economía y negocios. Universidad Nacional de San Martín, Argentina. 35 p.
- FAO, 2008. El estado mundial de la agricultura y la alimentación. FAO, Roma. 162 p.
- FAO, 2010. Global Forest Resources Assessment. Fao, Roma. 191p.
- FAO, 2011. Successes and failures with animal nutrition practices and technologies in developing countries. En H.P.S. Makkar, ed. Actas de la conferencia electrónica de la FAO. FAO Animal Production and Health Proceedings. No. 11. Roma, Italia.
- FAO, 2012. Términos y Definiciones. FAO, Roma, pp. 10.
- FAO, 2014. Anuario estadístico de la FAO. La alimentación y la agricultura en América Latina y el Caribe. Pág. 88.
- Fajardo, D., Johnston, R., Neira, L., Chará, J. & Murgueitio, E. 2010. Influencia de los sistemas silvopastoriles en la diversidad de aves en la cuenca del río La Vieja, Colombia. *Recursos Naturales y Ambiente* 58:9-16.
- Fuentes, J. A., Martínez, C. C., López, M.V., Arrúe, J. L. 2010. Fijación de carbono y reducción de emisiones de CO2 En: González EJ, Ordóñez R, Gil JA (coords.). Aspectos agronómicos y medioambientales de la agricultura de conservación: 89-96
- García, D., Wencomo, H., González, M., Medina, M., Cova, L., Spengler, I. 2008. Evaluación de diecinueve accesiones de *Leucaena leucocephala* basada en la calidad nutritiva del forraje. *Zootecnia Tropical* 26 (1): 9-18.
- Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. & Tempio, G. 2013. Enfrentando el cambio climático a través de la ganadería – Una evaluación global de las emisiones y oportunidades de mitigación. Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO). Roma, Italia. 153p.

- Godfray, C. H; Beddington, J. R. 2010. Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., Toulmin, C. 2010. Food Security: The Change of Feeding 9 Billion People. Science magazine. 327: 812-818.
- Guiot, J.D. 2001. Manual de actualización técnica. [cd-rom]. Semillas Papalotla, México. 64 p.
- Hare, M. D., Phengphet, S., Songsiri, T., Sutin, N. 2014. Botanical and agronomic grown of two Panicum maximum cultivars, Mombasa and Tanzania, at varying sowing rates. Tropical Grasslands. Volumen 2: 246-253.
- Herrero, M., Gerber, P., Vellinga, T., Garnett, T., Leip, A., Opio, C., Westhoek, H.J., Thornton, P.K., Olesen, J., Hutchings, N., Montgomery, H., Soussana, J.-F., Steinfeld, H., McAllister, T.A. 2011. Livestock and greenhouse gas emissions: The importance of getting the numbers right, Animal Feed Science and Technology, Volumes 166–167. Pages 779-782.
- Herrero, M., Grace, D., Njuki, J., Jonhson, N., Enahoro, D., silvestry, S., Rufino, M. 2013. The roles of livestock in developing countries. 1:3-18.
- Hernández, A., Marentes, F. L., Vargas, D., Ríos H. y Padrón, F. 2008. Características de los suelos y sus reservas de carbono en la finca la colmena de la Universidad de Cienfuegos, Cuba. Cultivos Tropicales. 29 (2): 27-34
- IEEGEI, 2005. Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero en Yucatán. SEDUMA. 120 p.
- INEGI, 2013. Carta de Uso del suelo y Vegetación, serie V. Disponible en www.inegi.com.mx
- INNEC, 2012. Instituto Nacional de Ecología y Cambio climático. Bases para una estrategia de bajo desarrollo en México. México, D.F. 120 p.
- IPCC, 2007. Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change, Fourth Assessment Report. Cambridge, UK.

- Karlen, D. L. and S. S. Andrews. 2000. The soil quality concept: A tool for evaluating sustainability. pp. 15-26. *In*: S. Elmholt, B. Stenberg, A. Gronlund, and V. Nuutinen (eds). Soil stresses, quality and care. DIAS report, 38. Danish Institute for Agricultural Sciences. Tjele, Dinamarca.
- Ku-Vera, J.C., Ayala-Burgos, A.J., Solorio-Sánchez, F.J., Briceño-Poot, E.G., Ruiz-González, A., Piñeiro-Vázquez, A.T., Barros-Rodríguez, M., Soto-Aguilar, A., EspinozaHernández, J.C., Albores-Moreno, S., Chay-Canul, A.J., Aguilar-Pérez, C.F. & Ramírez-Avilés, L. 2013. Tropical tree foliages and shrubs as feed additives in ruminant rations. *En*: Nutritional Strategies of Animal Feed Additives. Nova Sci. Publishers. New York. USA. Pp. 59-76
- Lal, R., Follet, R.F., Stewart, B.A., Kimble, J.M. 2007. Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security. *Soil science* 172, 943- 956.
- Lal, R. 2008. Soil carbon stocks under present and future climate with specific reference to European ecoregions. *Nutrient Cycling Agroecosystems* 81, 113–127.
- Lal, 2014. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* (34): 443-454.
- Lema, V., F.L., Polania, J. 2007. Estructura y dinámica del manglar del delta del Rio Ranchería, Caribe colombiano. *Revista Biología Tropical (Int. J. Trop. Biol. ISSN-0034-7744)* Vol 55 (1): 11-21.
- Lizárraga, S. H., Solorio, S. F. J. Y Sandoval, C. C. A. 2001. Evaluación agronómica de especies arbóreas para la producción de forraje en la Península de Yucatán. *Livestock Research for Rural Development* 13(6): 1-10.
- Mejia, C. J. B., Ramón, I. M. L. y Salinas, C. E. F. 2009. Determinación del valor nutricional de leucaena (*Leucaena leucocephala*) cruda, lavada y con sulfato ferroso al 0.5% y 1% en raciones para pollos de engorde. Tesis de licenciatura. Universidad del Salvador. Buenos Aires, Argentina. 55 p.
- Molina, I., Angarita, E.A., Mayorga, O.L., Chará, J., Barahona, R. 2016. Effect of *Leucaena leucocephala* on methane production of Lucerna heifers fed a diet based on *Cynodon plectostachyus*. *Livestock Science*. 185: 24– 29. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2016.01.009>

- Montagnini, F., Somarriba, E., Murgueitio, E., Fassola, H., Eibi, B., 2015. Sistemas agroforestales: funciones productivas, socioeconómicas y ambientales. Serie técnica. Informe técnico402. CATIE, Turrialba, Costa Rica. Pág. 454.
- Murgueitio, E., Calle, Z., Uribe, F., Calle, A., Solorio, B. 2011. Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. *Forest Ecology Managment*, 261:1654-1663.
- Murgueitio, E., Chara, J., Barahona, R., Cuartas, C., Naranjo, J. 2014. Los sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi), herramienta de mitigación y adaptación al cambio climático. *Tropical and subtropical Agroecosystems*, 17: 501-507.
- Nair, P. K. R., V. D. Nair, B. M. Kumar, J. M. Showalter. 2010. Carbon sequestration in agroforestry systems. *Advances in Agronomy* 108: 237–307.
- Nair, P.K., Nair, V. 2014. Solid-fluid-gas: the state of knowledge on carbon sequestration potencial of agroforestry systems in Africa. *Enviromental Sustainability* (6): 22-27.
- Palacio, A. A. R., F. H. M, Hurtado. 2008. Respiración microbial y de raíces en suelos de bosques tropicales primarios y secundarios (Porce, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomia. Medellín*, 61:4381- 4393.
- Pantawat, S. 2012. Effect of organic fertilizer use in rice paddy to reduce greenhouse gases. 2nd International Conference on Environmental and Agriculture Engineering IPCBEE 37, Singapore.
- Peters, M., Rao, I., Fisher, M., Subbarao, G., Martens, S., Herrero, M., van der Hoek, R., Schultze-Kraft, R., Miles, J., Castro, A., Graefe, S., Tiemann, T., Ayarza, M., Hyman, G. 2013. Tropical forage-based systems to mitigate greenhouse gas emissions. *In: Hershey, CH., Neate, P., eds. Eco-Efficiency: From vision to reality. CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical), Cali, Colombia. p. 171–190.*
- Pérez, E. R. 2008. El lado oscuro de la ganadería. *Problemas del desarrollo. Revista latinoamericana de economía*. 39 (154): 216-227.
- Pidwirny, M. 2012. Carbon cycle. Retrieved from <http://www.eoearth.org/view/article/150923>.

- Puricelli, 2011. El mercado mundial de la carne bovina. En: Origen, evolución, estadísticas y análisis de la ganadería. *Revista Brangus*, B.s. As 33(63):60-64.
- Rivera, L., Armbrrecht, I. & Calle, Z. 2013. Silvopastoral systems and ant diversity conservation in a cattle-dominated landscape of the Colombian Andes. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 181:188-194.
- Rivero-Romero, A. D., Moreno-Calles, A. I., Casas, A., Castillo, A., & Camou-Guerrero, A. 2016. Traditional climate knowledge: a case study in a peasant community of Tlaxcala, Mexico. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 12, 33. <http://doi.org/10.1186/s13002-016-0105-z>
- Sagarpa, 2004. Sistema de Información Agropecuaria de Consulta. México. 2004
- Sagarpa, 2012. México: El sector agropecuario ante el desafío del cambio climático. 45 p.
- Seduma, 2010. Informe del Diagnóstico Integral para el Manejo de Residuos Sólidos en el Estado de Yucatán. Secretario de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente.
- Sierra, J. 2011. Producción y manejo agroecológico de pasturas y cultivos forrajeros en el trópico: para una ganadería natural más limpia, eficiente, rentable y sostenible. ISBN 978-958-714-465-9. Editorial Universidad de Antioquia ®. Medellín, Colombia.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R.B., Berntsen, T., Bindoff, N.L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Gregory J.M., Hegerl, G.C., Heimann, M., Hewitson, B., Hoskins, B.J., Joos, F., Jouzel, J., Kattsov, V., Lohmann, U., Matsuno, T., Molina, M., Nicholls, N., Overpeck, J., Raga, G., Ramaswamy, V., Ren, J., Rusticucci, M., Somerville, R., Stocker, T.F., Whetton, P., Wood, R.A., and Wratt, D., 2007. Resumen Técnico. En: *Cambios Climáticos 2007: Base Física de la Ciencia. Aportes del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambios Climáticos* *En*: Solomon, S., D. Qin., M. Manning, Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., and Miller H.L. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos.

- Solorio, S. F., Solorio, S. B. 2008. *Leucaena leucocephala* (guaje) una opción forrajera en los sistemas de producción. Manual de manejo agronómico de *Leucaena leucocephala*. Fundación Produce, Michoacán. 48 p.
- Solorio, S.F., Wright, J., Franco, J.A., Basu, S.K., Sarabia, S.L, Ramírez, L., Ayala, B.A., Aguilar, P.C., Ku, J.C. 2017. Silvopastoral Systems: Best Agroecological Practice for Resilient Production Systems Under Dryland and Drought Conditions. In: Ahmed y Stocle (eds) Quantification of Climate Variability, Adaptación and Mitigation for Agricultural Sustainability, pp 233-250.
- Torres, B., Moreno, M., Cancino, S., Hernández, A., Pérez, J., Vázquez, A. 2010. Rendimiento y calidad de semilla de pasto guinea (*Panicum maximum* Jacq.) cv. Tanzania usando la fitohormona esterooidal cidef-4. *Revista Mexicana Ciencias Pecuarias* 1(3):237-249.
- Tortora, G., Funke, B., Case, C. 2007. *Introducción a la microbiología*. Buenos Aires: Médica Panamericana. Madrid, España. 14 p.
- Trumper, K., Bertzky, M., Dickson, B., Van der Heijden, G., Jenkins, M., Manning. P. 2009. ¿La Solución Natural? El Papel de los Ecosistemas en la Mitigación del Cambio Climático. Informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. 76 p.
- UNESA, 2005. Forestación y Reforestación. Sumideros de Carbono. En: Metodologías para la Implementación de los Mecanismos flexibles de Kioto – Mecanismo de Desarrollo Limpio en Latinoamérica. Capítulo 8. Red de Centros de Documentación en Energía en América Latina y el Caribe.
- Verdecia, D. M.; Ramírez, J. L.; López, Y. 2008. Rendimiento y componentes del valor nutritivo del *Panicum maximum* cv Tanzania. REDVET. Revista electrónica de Veterinaria. Volumen IX. Núm. 5.
- Vermeulen, S.J., Campbell, B.M., Ingram, J.S.I. 2012. Climate change and food systems. *Annual Review of Environment and Resources* 37:195–222. doi:10.1146/annurev-environ-020411-130608.

- Villaseñor, J.L. y Espinosa G., F.J. 1998. Catálogo de Malezas de México. Universidad Nacional Autónoma de México y Fondo de Cultura Económica. México, D.F. 449 pp. ISBN 968-16-5878-7 Lists 2298 weed species found in Mexico, including their distribution and the crops or productive systems where they have been collected.
- Xóchitl, M y Solorio, B. 2012. Ganadería Sustentable. 2a Etapa del Proyecto Estratégico de Prioridad Nacional “Desarrollo y Fomento de los Sistemas Silvopastoriles Intensivos como alternativa alimenticia para la producción de carne y leche en regiones tropicales. Fundación Produce Michoacán, Sagarpa. 215 p.

Artículo Científico

**ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN UN SISTEMA SILVOPASTORIL INTENSIVO
EN YUCATAN, MEXICO**

M. Gallegos ^{1*}, F. J. Solorio ¹, J. K. Vera ¹

*¹Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad Autónoma de Yucatán¹. Apdo
Postal 4-116 Itzimmá. Mérida, Yucatán. México. Magallegos842@gmail.com, ssolorio@uady.mx,
Kvera@uady.mx*

Formato para enviarlo a la revista Agroforestry Systems

ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN UN SISTEMA SILVOPASTORIL EN YUCATAN, MEXICO

M. Gallegos- Pérez, ^{1*} F. J. Solorio-Sánchez, ¹ J. Kú -Vera ¹

^aCampus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad Autónoma de Yucatán¹. Apdo Postal 4-116 Itzimmá. Mérida, Yucatán. México. Magallegos842@gmail.com, ssolorio@uady.mx, Kvera@uady.mx

Resumen: El objetivo del estudio fue evaluar el almacenamiento de carbono en biomasa aérea y subterránea en un sistema silvopastoril intensivo (SSPi), conformado por *Leucaena leucocephala* asociado a *Panicum maximum*, en Yucatán, México. En cada unidad experimental se utilizaron 3 parcelas de muestreo (17m x 150m). Los datos fueron analizados en un diseño completamente al azar con tres repeticiones cada uno. Se estimó la biomasa aérea y subterránea, el contenido de carbono, fracción de carbono y almacenamiento total en cada uno de los sistemas. El sistema silvopastoril obtuvo la mayor producción de biomasa subterránea (1610 kg MS ha⁻¹) y biomasa total (4580.77 kg MS ha⁻¹) comparada con el monocultivo. Así mismo, el carbono en suelos en el SSPi (54.29 Mg ha⁻¹) y la fracción de carbono fue mayor (12.13%) en el estrato de 0 a 10 cm. El carbono acumulado en ambos sistemas fue similar. Se concluye que los sistemas silvopastoriles tienden a incrementar la producción de biomasa total, así mismo el contenido de carbono en los dos sistemas está influenciado por el tipo de sistema establecido y la edad de la plantación.

Palabras claves: Efecto invernadero, Sistemas silvopastoriles, Carbono, Ganado.

Introducción

En América Latina y el Caribe, la ganadería es una de las principales actividades para atender las demandas crecientes de alimento en el mundo (FAO 2009), producto del aunado aumento de la población, la urbanización y el consumo de proteína animal en la dieta. Esta actividad se desarrolla en una superficie de 11.8 millones de has, representando 58% del territorio nacional (Sagarpa 2012).

En el 2011, México transformó alrededor de 55.9 millones de hectáreas de vegetación natural a otros usos del suelo. De acuerdo a Inegi (2013), los tipos de vegetación que habían perdido mayor superficie hasta esa fecha fueron las selvas (23.4 millones de ha), seguidas por pastos naturales (6.5 millones), bosques templados (13 millones) y los matorrales (5.8 millones). Estos cambios en la vegetación produjeron tasas de degradación de suelos, fragmentación de paisajes, pérdidas de biodiversidad y emisión de gases de efecto invernadero principalmente CO₂ (Harvey et al. 2008). Aunado a esto, las reservas de carbono en el suelo se han modificado, debido a una disminución de materia orgánica en la superficie y a la destrucción de macro y micro agregados que forman la estructura del suelo (Trumper et al. 2009). Debido a que el carbono se almacena en los árboles, hojarasca y los suelos (Pantawat 2012), es necesario incrementar la captura o almacenamiento de C en la fitomasa o vegetación (Lal 2007).

Ante tal problemática, se plantea la implementación de sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi) como una herramienta de mitigación y adaptación al cambio climático. Estos sistemas se caracterizan por una alta densidad de árboles o arbustos en asociación con árboles leguminosos y gramíneas (Zuloaga 2011). La ventaja de estos sistemas radica en que el suelo destinado a la ganadería puede sostener una mayor cantidad de biomasa fotosintética que potreros establecidos solamente con pastos (Peters et al. 2013). Se estima que la mayor acumulación de carbono ocurre en el suelo almacenándose un 60% en comparación con la biomasa aérea. Estos sistemas crean un microclima favorable en los sistemas mejorando la productividad e incrementando de esta manera los depósitos de carbono en el suelo y vegetación leñosa contribuyendo a la mitigación del cambio climático (Cubbage et al. 2013).

Estudios reportan que la inclusión de plantas de *L. leucocephala* en los sistemas silvopastoriles pueden lograr el secuestro de carbono, especialmente si es establecida en altas densidades y con estabilidad en el tiempo (Anguiano et al. 2013), Debido a esto, el objetivo del estudio fue evaluar la captura de carbono en un sistema silvopastoril intensivo basado en Leucaena (*L. leucocephala*) asociado a pasto guinea (*P. maximum*) en Yucatán, México.

Materiales y Métodos

Sitio de estudio

El estudio se realizó en el Rancho Kampepén, ubicado en el poblado de San José Tzal, Yucatán, México. El sitio de estudio se encuentra en las coordenadas situadas a los 20° 39 Latitud N y 89° 50 Longitud Oeste. La temperatura media anual del lugar es de 27.4 °C, con el mes de abril como el más caluroso, cuando se alcanzan temperaturas máximas de 37.2 °C, y mínimas de 22.4 °C, el mes más frío es febrero, con una temperatura máxima de 30°C y una mínima de 16.3 °C (Conagua 2015). La humedad relativa varía de 57 %, en el mes de marzo, a 79 %, en el mes de junio.

El tipo de suelo predominante en el área de estudio es el leptosol (Estrada-Medina et al. 2013), se caracteriza por ser de textura media, de color café con diferentes matices, hallándose en planadas y altillos del micro-relieve, es un suelo de moderada fertilidad, con 1-1.5 % de carbono orgánico y un pH de 7.5 a 7.8 (Bautista et al. 2005).

Tratamientos y diseño experimental

El periodo de estudio estuvo comprendido de Julio a Diciembre de 2015. En el estudio se utilizaron dos sistemas de producción: un sistema silvopastoril de 0.25 ha, con densidad de 8,000 a 12, 000 plantas ha⁻¹ de Leucaena (*L. leucocephala*) asociado a pasto guinea (*P. maximum*) con densidad de 20, 000 plantas ha⁻¹ y un monocultivo de pasto guinea (*P. maximum*). El sistema silvopastoril tenía 5 años de establecido. Dicho sistema fue empleado para pastoreo de bovinos de engorda cruce de cebú-suizo, con periodos de ocupación de 3 días y un periodo de descanso de 35 a 45 días. La carga animal fue de 4

UA. El monocultivo de pasto Guinea (*P. maximum*) tenía 10 años de establecido, el cual fue sembrado al voleo, con densidad de 20, 000 plantas ha⁻¹. El periodo de descanso de dicho pasto en monocultivo fue de 35 a 45 días. La carga animal fue de 4 UA. Estos sistemas recibían riego por aspersión 2 veces por semana en época de secas. En cada unidad experimental, se seleccionaron 3 parcelas permanentes de muestreo de 17 x 150 m en un diseño completamente al azar con tres repeticiones cada una (Figura 3).

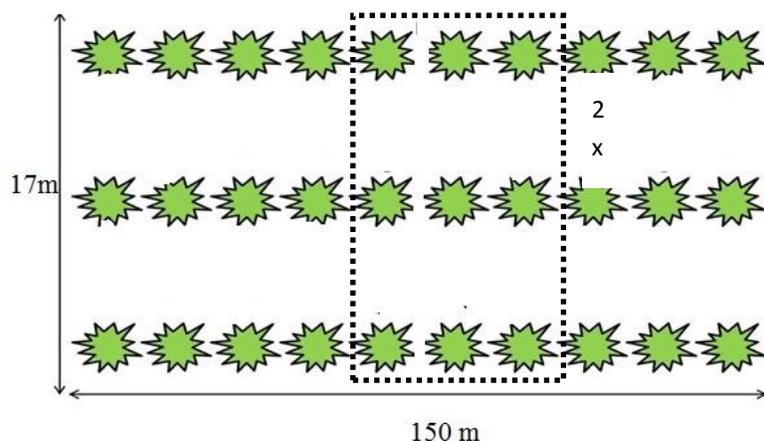


Fig. 3 Esquema representativo del diseño experimental en Kampepén, Yucatán

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados usando el programa estadístico Sigma plot 11.0 (Systat Software, Inc), realizándose una comparación de medias usando una prueba de T.

Variables de respuesta

Muestreos de biomasa 150m

Se utilizaron métodos directos de medición (destruictivos) para la toma de muestras de biomasa aérea y subterránea de la leguminosa. Para la obtención de la biomasa aérea del sistema SSPi, se seleccionaron 9 plantas de cada parcela en un área de 2.0 x 2.0 m de acuerdo a la metodología de Casanova-Lugo et al. (2010). Cada poda de biomasa se realizó

a una altura de 1.5 m. Una vez cortado el material, fue recolectado, pesado en fresco y separado en componentes (hojas, tallos y raíces) para finalmente ser colocados en una estufa de circulación de aire forzado a 60° C por 48 hrs. Para las raíces se realizaron 2 podas por cada sistema al inicio (Agosto) y final del experimento (Noviembre). Para el pasto, tanto del sistema silvopastoril y el monocultivo se empleó el método del cuadrante (Mostacedo 2000). Para ello, se emplearon 3 cuadrantes de 1 m × 1 m para cada parcela. Todo el pasto dentro de cada cuadrante fue extraído del suelo y pesado en fresco, después fue separado en diversos componentes: hojas, tallos y raíz. Los componentes fueron secados en una estufa de circulación de aire forzado a 60° C, hasta peso constante. Cabe señalar que a cada una de las variables se le determinó el promedio para su posterior análisis.

Fracción de carbono en biomasa aérea y subterránea

Para estimar la fracción de carbono en la biomasa de *Leucaena* y pasto, se tomó una muestra (200 gr) de cada componente (hojas, tallos gruesos y raíces). Las muestras se secaron y pulverizaron por separado, en un molino hasta obtener una partícula de 0.25 mm y posteriormente el contenido de carbono se determinó mediante el método de combustión en seco en un analizador Leco (Leco Corporation 1994).

Carbono orgánico del suelo (COS)

El contenido de carbono del suelo se determinó usando calicatas (Amezquita et al. 2004). Este método consiste en excavar tres calicatas de 0.25 m × 0.25 m divididas en incrementos de 10 cm, obteniéndose tres estratos o profundidades (i.e. 0-10 cm, 10-20 cm, y de 20-30 cm) en cada parcela. En cada estrato se determinó la densidad aparente, con un cilindro metálico de 10 cm de largo y 8 de diámetro (Rubio 2010). Dichas muestras fueron secadas a temperatura ambiente y después fueron tamizadas en una criba de 5 mm, escogiendo aleatoriamente una muestra de 100g para determinar el contenido de carbono (Schlegel et al. 2001). Para estimar la fracción de carbono en suelo, primero se determinó la materia orgánica (MO) por el método de Walkley y Black (1934). Posteriormente el valor resultante se dividió entre 1.7 para convertir el % de MO en Carbono (Miranda et al. 2007).

Para calcular el COS de cada sistema, se utilizó la ecuación propuesta por (Segura y Kanninen 2005), tal como se describe a continuación:

$$\text{COS (Mg C ha}^{-1}\text{)} = \text{FC} \times \text{DA} \times \text{Pm} \times \text{A}$$

Donde FC, es la fracción de C (%), DA, es la densidad aparente del suelo (t m^{-3}), Pm, profundidad de muestreo (cm), y A, es el área de muestreo (ha) Mg C = Megagramos/Toneladas de carbono.

Almacenamiento de C

Finalmente, el C almacenado se calculó mediante la ecuación propuesta por (Soto-Pinto et al. 2010) para agro-ecosistemas tropicales.

$$\text{C almacenado (Mg C ha}^{-1}\text{)} = (\text{BA} + \text{BS} + \text{COS})$$

En donde el C almacenado fue obtenido por la suma de los reservorios de C de la biomasa aérea (BA), BS= la suma de carbono de la biomasa subterránea y el COS= carbono orgánico del suelo Mg = Megagramo/Toneladas

Resultados

Rendimiento de biomasa aérea y subterránea

La tabla 1 muestra el promedio en kg/MS/ha^{-1} de la biomasa aérea y subterránea del SSPi comparado con el monocultivo. No se observaron diferencias en la biomasa aérea del sistema silvopastoril ($P = 0.493$) en relación con el sistema en monocultivo, solo presentó diferencias en la biomasa subterránea ($P < 0.050$). Así mismo, la biomasa total del sistema silvopastoril fue mayor ($P = 0.047$).

Tabla 1 Promedio de Biomasa aérea y subterránea en un sistema silvopastoril y en un monocultivo de pasto en Kampepén, Yucatán.

Biomasa (kg ms ha⁻¹)			
sistema	<i>aérea</i>	<i>subterránea</i>	<i>Total</i>
<i>L. leucocephala</i>	450 (± 4.25)	381 (± 5.20)	831 (± 9.45)
<i>P. maximum del SSPi</i>	2511 (± 22.99)	1230 (± 28.97)	3741 (± 51.96)
SSPi	2961 (± 27.24)a	1611 (± 34.17)a	4572 (± 61.41)a
Monocultivo	2761 (± 12.40)a	891 (± 16.49)b	3652 (±38.89) b

Medias (± error estándar) seguidas de letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas usando una prueba de T. SSPi = Sistema silvopastoril intensivo.

Carbono de la biomasa

No se observaron diferencias estadísticas en el carbono de la biomasa aérea (P= 0.265) y subterránea en ambos sistemas (P= 0.257), ni en el carbono total de la biomasa (P= 0.563) (Tabla 2).

Tabla 2. Promedio de Carbono de la biomasa aérea y subterránea de *P. maximum* en un sistema silvopastoril intensivo y en monocultivo en Kampepén, Yucatán.

	Carbono orgánico en biomasa (Mg ha ⁻¹)	
	<i>P. maximum</i>	PM
Aérea	72.40 (± 1.81)	70.8 (± 1.11)
Subterránea	36.77 (± 3.53)	34.89 (± 1.56)
Total	109.17 (± 5.34)	105.69 (± 2.67)

Medias seguidas de letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas de acuerdo a la prueba de T. PM= Pasto en monocultivo

Fracción de carbono

La fracción de carbono en el suelo solamente fue diferente ($p = 0.010$) en la profundidad de 0 a 10 cm en favor del sistema silvopastoril comparado con el sistema en monocultivo (Tabla 3).

Tabla 3. Fracción de carbono a tres profundidades de suelo en un sistema silvopastoril y en un monocultivo de pasto en Kampepén, Yucatán.

Profundidad del suelo (cm)	Fracción de Carbono (%)	
	SSPi	PM
0-10	12.13 (± 0.91) b	10.62 (± 0.32) a
10-20	11.55 (± 1.28) a	9.82 (± 0.14) a
20-30	8.85 (± 0.67) a	9.21 (± 0.45) a
Total	32.56 (± 0.64) a	29.65 (± 0.23) a

Medias (\pm error estándar) seguidas de letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas de acuerdo a la prueba de T. SSPi = sistema silvopastoril intensivo PM= Pasto en monocultivo

Carbono orgánico de suelo

La tabla 4 muestra el promedio de carbono orgánico del suelo a diferentes profundidades. El sistema silvopastoril presentó mayor almacenamiento de carbono en la profundidad de 0 a 10 cm comparado con el monocultivo ($P = 0.028$), sin diferencias, ($P = 0.166$) en los otros estratos.

Tabla 4. Promedio de Carbono orgánico en el suelo a diferentes profundidades en un sistema silvopastoril intensivo y un monocultivo en Kampepén, Yucatán.

Profundidad del suelo (cm)	Carbono orgánico de suelo (Mg ha^{-1})	
	SSPi	PM
0-10	54.29 (± 3.61) a	40.70 (± 1.71) b
10-20	43.09 (± 4.13) a	40.41 (± 1.38) a
20-30	36.03 (± 2.34) a	40.52 (± 1.98) a
Total	133.42 (± 10.09) a	121.64 (± 5.09) a

Medias (\pm error estándar) seguidas de letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas de acuerdo a la prueba de T. SSPi = sistema silvopastoril intensivo PM= Pasto en monocultivo

Carbono almacenado total

La figura 4 muestra el carbono total almacenado de los sistemas silvopastoril intensivo y un monocultivo. No se observaron diferencias estadísticas ($P= 0.257$) en el carbono acumulado entre los dos sistemas. Los valores fueron de $347.48 \text{ Mg C ha}^{-1}$ para el sistema silvopastoril y $227.33 \text{ Mg C ha}^{-1}$ para el monocultivo.

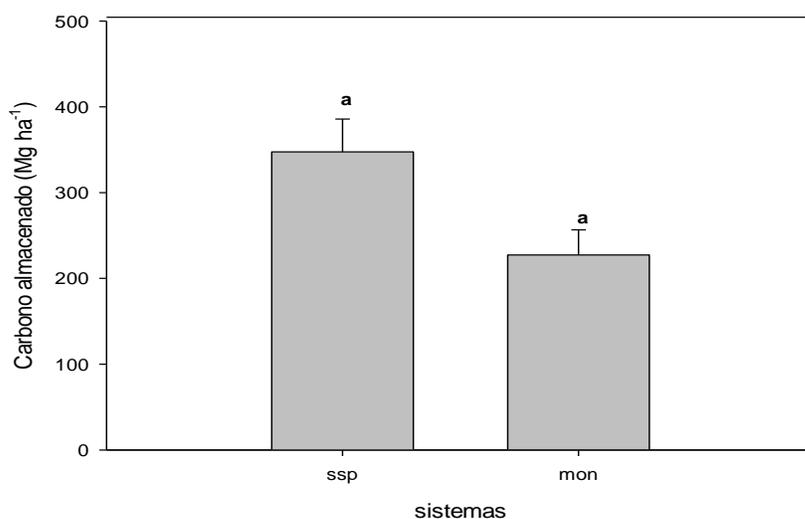


Fig. 4 Carbono promedio almacenado en un sistema silvopastoril intensivo y un monocultivo en Kampepén, Yucatán.

Discusión

Rendimiento de Biomasa aérea y subterránea

El hecho de que el sistema silvopastoril haya presentado una mayor biomasa radical en comparación con el monocultivo, se debe principalmente a la acumulación de materia orgánica producto de la hojarasca y su asimilación por parte de las raíces (Eckeren et al. 2010). Por su parte, Liu et al. (2006) señalaron que los nutrientes liberados durante la descomposición de la hojarasca constituyen entre 70-90 % del total de nutrientes requeridos por las plantas. El presente estudio muestra que los resultados en el área de estudio fueron mayores a los encontrados por Paz et al. (2015) para un sistema silvopastoril conformado

por *L. leucocephala* y *P. maximum*, donde el sistema silvopastoril obtuvo una producción de 16.36 Mg MS ha⁻¹ comparado con *P. maximum* que fue de 1.37 Mg MS ha⁻¹.

Estas diferencias encontradas en el sistema pudieron deberse a las condiciones ambientales, al tipo de arreglo establecido y a la densidad de plantas encontradas en el área de estudio, ya que las especies leñosas tienden a disminuir el diámetro del tallo para la asimilación de carbohidratos y formación de nuevos rebrotes (Götmark et al. 2016). Por otra parte, la incorporación de especies arbustivas con pastos tiende a incrementar la oferta de forraje, ya que las raíces penetran en los estratos profundos del suelo, además; necesitan menos radiación solar que las gramíneas por lo que beneficia al pasto acompañante (Guevara y Guenni 2013).

Con respecto a la producción de biomasa total, el sistema silvopastoril obtuvo una mayor producción (4,572 kg MS ha⁻¹), comparado con el monocultivo que fue de 3,652 kg MS ha⁻¹. Gaviria et al. (2012) reportaron una mayor producción que la encontrada en este estudio de 19, 260 kg MS ha⁻¹ durante la época de lluvias en un sistema silvopastoril asociando pasto estrella (*C. nlemfuensis*), Pasto guinea (*P. maximum*) y Leucaena (*L. leucocephala*) con densidad de 10, 000 plantas por ha⁻¹. Estas diferencias encontradas en el sistema pudieron deberse al manejo y al arreglo del sistema establecido, ya que la incorporación de especies arbustivas, tiende a incrementar la oferta de forraje disponible (Cuartas et al. 2013).

Carbono orgánico de la biomasa

El hecho de que el carbono en la biomasa fuera similar en ambos sistemas puede ser explicado por las especies evaluadas y el tejido del árbol (Yerena et al. 2012), debido a que la producción de biomasa aérea tiende a incrementar con la actividad fotosintética y por ende se incrementa la producción de carbohidratos, llegando a oscilar entre un 45 a 50%. Principalmente, los órganos reproductivos o vegetativos originan que el carbono se almacene como un compuesto de reserva, por lo que la producción de biomasa está relacionada con la cantidad de carbono que puede almacenar la planta. Asimismo, en los tallos la mayor parte del carbono está disponible como celulosa y lignina y este varía según

el tamaño del fuste (Yerena et al. 2012). Los resultados del presente estudio fueron mayores a los reportados por López et al. (2015) en un sistema silvopastoril en Michoacán obteniendo 29.01 Mg C ha⁻¹ para la biomasa aérea y 91.64 Mg C ha⁻¹ para biomasa subterránea. Estas diferencias pueden explicarse por la densidad de plantación de los sistemas y las condiciones de precipitación, las cuales influyen en los procesos fisiológicos y las características anatómicas de las especies.

Fracción de carbono

La fracción de carbono se mantuvo en el valor promedio de densidad ideal de los suelos, la cual fue de 1 (López y Estrada 2015), así mismo en un estudio realizado en SSPi en Michoacán de *L. leucocephala* asociado a *Panicum maximum*, en una densidad de 34, 000 plantas por ha⁻¹, se encontró que la fracción de carbono en el suelo fue mayor en el sistema silvopastoril que en el monocultivo. Estos resultados fueron similares a los encontrados en el estudio. Esto pudo deberse a que los sistemas silvopastoriles tienen el potencial de ser más productivos, ya que cuentan con un mayor número de interacciones subterráneas, que optimizan las entradas de carbono en el suelo a través de los agregados. Así mismo, se ha reportado, que existe una relación entre el carbono y tamaño de los agregados, ya que la agregación y la estabilidad de la estructura del suelo aumentan con el contenido de materia orgánica disponible. Es por esto que el carbono orgánico del suelo dependerá de la composición mineral del suelo y el tipo de vegetación (Schrumpp et al. 2013).

Carbono orgánico del suelo

El hecho de que se encontrara una mayor cantidad de carbono orgánico en el sistema silvopastoril en comparación con el monocultivo se debe principalmente a las profundidades en los horizontes del suelo, ya que se ha reportado que las mayores tasas de asimilación de carbono se encuentran en los estratos superiores y estos valores disminuyen conforme aumenta la profundidad de muestreo (Shi et al. 2013), como resultado de la cercanía a las sitios de deposiciones de las excretas del ganado y la descomposición por

parte de la biota edáfica y las raíces del suelo, acelerando de esta manera el proceso y reciclaje de nutrientes (Haile et al. 2010).

Estos resultados encontrados en el área de estudio son mayores a los reportados por (Lok 2013) para un sistema silvopastoril compuesto por *L. leucocephala* y *P. maximum* donde la mayor cantidad de carbono se encontró en los primeros 45 cm de profundidad (65.43 Mg C ha⁻¹). Estas diferencias estuvieron influenciadas por el tiempo de explotación de los sistemas, ya que los sitios de estudio no superaron los 10 años de explotación en comparación con lo reportado por este autor, así mismo su composición botánica fue mayor que la reportada en el área de estudio y el manejo al que fueron sometidos los animales fue diferente. Harvey et al (2013) señalan que la incorporación de hojarasca resultado de una mayor producción de biomasa contribuye a mejorar los depósitos de carbono en el suelo y su dinámica de ciclaje de nutrientes, los cuales se encuentran relacionados con la fauna edáfica.

Carbono almacenado total

Los resultados provenientes de los sistemas evaluados presentaron una diferencia numérica pero no estadística. Esta similitud encontrada en el carbono acumulado en ambos sistemas pudo estar relacionada con la densidad aparente del suelo la cual fue similar tanto en el sistema silvopastoril como en el monocultivo. Estudios afirman que valores inferiores a 1 g·cm⁻³ son característicos de suelos orgánicos (Paz et al. 2006), los cuales promueven que los suelos sean más sueltos, favoreciendo de esta manera el crecimiento y exploración de las raíces, facilitando su aireación y toma de nutrientes por las plantas tal como lo reporta Van Astem et al (2011). En Colombia se comparó un sistema silvopastoril de *L. leucocephala* (2,000 plantas en 0.8 ha⁻¹) y *P. maximum cv* contra un pasto natural, resultando 126.62 Mg C ha⁻¹ de carbono secuestrado total para el sistema silvopastoril y 32.5 Mg C ha⁻¹ para el pasto natural (Torres et al. 2011). Estos valores son inferiores a lo reportado en este estudio, lo que pudo deberse a la densidad de plantas de *L.leucocephala* utilizada, ya que se ha reportado que el carbono acumulado esta influenciado por el manejo silvícola (Peichl et al. 2006), por lo que el material vegetal y hojarasca depositado por las

especies leñosas, además de fijar nitrógeno al suelo tienden a incrementar los valores de carbono. Por lo tanto, factores como densidad de siembra y genética de cada especie, podrían afectar más el comportamiento de este componente.

Conclusiones

Los resultados de este estudio demuestran que la producción de biomasa total encontrada en los dos sistemas fue diferente, siendo mayor en el sistema silvopastoril intensivo. En lo que respecta al contenido de carbono acumulado, no se encontraron diferencias en la biomasa aérea y subterránea. Así mismo, la fracción de carbono y el carbono orgánico del suelo fue diferente en los primeros estratos.

Agradecimientos

Agradecemos al Dr. Baldomero Solorio Sánchez por las facilidades proporcionadas durante el periodo de investigación en el Rancho Kampepén y al Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias por la realización de los análisis de laboratorio del presente estudio

Referencias

- Amézquita MC, Ibrahim M, Buurman P (2004) Carbon Sequestration in Pasture, Agropastoral and Silvopastoral Systems in the American Tropical Forest Ecosystem. In Mannetje L't, Ramírez L, Ibrahim M, Sandoval N, Ojeda JK (eds) The Importance of Silvopastoral Systems in Rural Livelihoods to Provide Ecosystem Services . Florida, USA, pp 303-309
- Anguiano JM, Aguirre J y Palma JM (2013) Establecimiento de *Leucaena leucocephala* con alta densidad de siembra bajo cocotero (*Cocos nucifera*). Revista Cubana de Ciencia Agrícola 46: 103-107
- Bautista F, Palma-López D, Huchin-Malta W (2005) Actualización de la clasificación de los suelos del estado de Yucatán, p. 105- 122 en: Bautista F y Palacio G (eds) Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, pp 282
- Casanova LF, Caamal MJA, Petit AJ, Solorio SF, Castillo CJ (2010) Acumulación de carbono en la biomasa de *Leucaena leucocephala* y *Guazuma ulmifolia* asociadas y en monocultivo. Revista Forestal Venezolana, 54(1): 45-50
- Conagua (2015) Comisión Nacional del Agua. Estación del observatorio de Mérida. Temperatura y Precipitación del periodo de Enero a Diciembre 2015 www.conagua.gob.mx
- Cuartas C, Naranjo J, Tarazona A, Murgueitio E, Chará J, Kú V (2013) Contribution of intensive silvopastoral systems to animal performance and to adaptation and mitigation of climate change. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 27 (2):76-94
- Cubbage F, Balmelli G, Bussoni A, Noellemeyer E, Pachas A N, Fassola H, Colcombet L, Rossner B, Frey G, Dube F, De Silva, ML Stevenson H, Hamilton J, Hubbard W (

- 2013) Comparing silvopastoral systems and prospects in eight regions of the world. *Agroforest Syst*, doi:10.1007/s10457-012-9582-z
- Eekeren van N, Bos M, Wit J, Keidel H & Bloem J (2010) Effect of individual grass species and grass species mixtures on soil quality as related to root biomass and grass yield. *Appl Soil Ecol* 45:275
- Estrada-Medina H, Graham R, Allen M., Jiménez-Osornio J, Robles-Casolco S (2013) The importance of limestone bedrock and dissolution karst features on tree root distribution in northern Yucatan, México. *Plant and Soil* 362:37-50
- Fao (2009) *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*. Roma, Italia
- Gaviria X, Sosa CP, Montoya C, Chará J, Lopera JJ, Córdoba CP, Barahona R (2012) Producción de Carne Bovina en Sistemas Silvopastoriles Intensivos en el Trópico Bajo Colombiano. VII Congreso Latinoamericano De Sistemas Agroforestales Para La Producción Animal Sostenible, Belén, Brasil
- Guevara E, Guenni O (2013) Densidad y longitud de raíces en plantas de *Leucaena leucocephala* (Lam) De Wit. *Revista multiciencias* 13(4) 372-380
- Götmark F, Götmark E, Jensen AM (2016) Why Be a Shrub? A Basic Model and Hypotheses for the Adaptive Values of a Common Growth Form. *Frontiers in Plant Science* 7:1095. doi:10.3389/fpls.2016.01095
- Haile SG, Nair VD, Nair PKR (2010) Contribution of trees to carbon storage in soils of silvopastoral systems in Florida, USA. *Global Chang Biol* 16:427–438. doi:10.1111/j.1365-2486.2009.01981.x
- Harvey CA, Villanueva C, Ibrahim M, Gómez R, López M, Kunth S y Sinclair F (2008) Productores, árboles y producción ganadera en paisajes de América Central: implicaciones para la conservación de la biodiversidad. en: Harvey, C y Saenz, J. (eds) *Evaluación y conservación de biodiversidad en paisajes fragmentados de Mesoamérica*. Santo Domingo de Heredia, Costa Rica. Instituto Nacional de Biodiversidad (INBIO), pp 197–224

- Harvey C, Chacón M, Donatti C, Garen E, Hannah L, Andrade A, Bede L, Brown D, Calle A, Chará J, Clement C, Gray E, Hoang M, Minang P, Rodríguez A, Seeberg-Elverfeldt C, Semroc B, Shames S, Smukler S, Somarriba E, Torquebiau E, van Etten J, Wollenberg E (2013) Climate-smart Landscapes: Opportunities and Challenges for Integrating Adaptation and Mitigation in Tropical Agriculture. *Conservation Letters* 7(2), pp 77-90
- INEGI (2013) Carta de uso actual del suelo y vegetación Serie III. México. www.inegi.gob.mx Accedido el 13 de Marzo 2016
- Lal R, Follet RF, Stewart BA, Kimble JM (2007) Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security. *Soil science* 172:943- 956
- Leco (1994) *Anal. Chem* 56 (9), pp 1025A–1025A
- Liu W, Fox JED & Hu Z (2006) Leaf litter decomposition of canopy trees, bamboo and Uunnan, south-west China. *Ecol Res*, 15: 435–447
- Lok SS, Fraga SA, García M (2013). Almacenamiento de Carbono en el suelo de tres sistemas ganaderos tropicales en explotación con ganado vacuno. *Revista Cubana de Ciencias Agrícolas*, tomo 47:1, pp 75-82
- López DM, Estrada MH (2015) Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. *Campus de Ciencias biológicas y Agropecuarias. Bioagrociencias* 8:1, pp 3-11
- Miranda T, Machado R, Machado H. & Duquesne P (2007) Carbono secuestrado en ecosistemas agropecuarios cubanos y su valoración económica. Estudio de caso. *Pastos y Forrajes* 30:483
- Mostacedo B (2000) Manual de métodos básicos de muestreos y análisis en ecología vegetal. Proyecto de Manejo forestal sostenible (BOLFOR). Santa cruz Bolivia, pp 12
- Pantawat S (2012) Effect of organic fertilizer use in rice paddy to reduce greenhouse gases. 2nd International Conference on Environmental and Agriculture Engineering IPCBEE 37, pp 1-7

- Paz E, Sánchez M, Sadeghian S (2006). Relación entre dos sistemas de sombrero de café y algunas propiedades del suelo en la meseta de Popayán, Colombia. *Acta Agronómica* 55(4), 1-6
- Paz F, Wong J y Torres R (2015) Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste, A.C y el Centro Internacional de Vinculación y Enseñanza de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Texcoco, Estado de México, México. ISBN en trámite. 678 p
- Peichl M, Thevathasan A, Gordon J, Huss J, Abohassan RA (2006) Carbon sequestration potentials in temperate tree-based intercropping systems, southern Ontario, Canada. *Agroforestry Syst* 66: 243-257
- Peters M, Herrero M, Fisher M, Erb K, Rao I, Subbarao G, Castro A, Arango J, Chará J, Murgueitio E, Van der Hoek R, Läderach P, Hyman G, Tapasco J, Strassburg B, Paul B, Rincón A, Schultze-Kraft R, Fonte S and Searchinger T (2013) Challenges and opportunities for improving eco-efficiency of tropical forage-based systems to mitigate greenhouse gas emissions. *Tropical Grasslands* 1: 156-167
- Rubio GA (2010) Densidad aparente en suelos forestales del parque natural los alcornocales. Instituto de recursos naturales y agrobiología de Sevilla. Sevilla, España
- Sagarpa (2012) México: El sector agropecuario ante el desafío del cambio climático, FAO.
- Schlegel B, Gayoso J, Guerra J (2001) Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Universidad Austral de Chile, pp 12

- Schrumpf M, Schulze, ED, Kaiser K, & Schumacher J (2013) How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? *Biogeosciences*. doi:10.5194/bg-8-1193-2011
- Segura M, Kanninen M (2005) Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. *Biotropica* 37(1): 2-8
- Shi S, Zhang W, Zhang P, Yu Y, Ding F (2013) A synthesis of change in deep soil organic carbon stores with afforestation of agricultural soils. *For Ecol Manag* 296:53–63. doi:10.1016/j.foreco.2013.01.026
- Soto-Pinto L, Anzueto M, Mendoza J, Jimenez G, De Jong B (2010) Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforest Syst* 78:39–51
- Torres JA, Espinoza W, Reddiar L y Vázquez A (2011) Secuestro de carbono en potreros arbolados, potreros sin árboles y bosque caducifolio de Huatusco, Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 13: 543-549
- Trumper K, M Bertzky, B Dickson, G Van der Heijden, M Jenkins, P Manning (2009) ¿La Solución Natural? El Papel de los Ecosistemas en la Mitigación del Cambio Climático. Informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, pp 76
- Van Asten, PJA, Wairegi LWI, Mukasa D, Urinei NO(2011) Agronomic and economic benefits of coffee–banana intercropping in Uganda’s smallholder farming systems. *Agricultural Systems*, 104:326–334
- Walkley A & Black A (1934) An examination of the Degtjoreff method for determination soil organic matter, and a proposed codification of the chromic acid titration method. *Soil Sci* 37:29
- Yerena Y, Jimenez P, Aguirre C, Treviño G, Alania R (2012) Concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del noreste de México. *Rev Mex de Cienc Forestales* 3: 49-56

Zuloaga FA, Zapata CA, Uribe TF, Murgueitio RE, Cuartas C, Naranjo FJ, Hernando SL
2011. Arreglos silvopastoriles. en: Vázquez (ed) Capacitación en establecimiento de
sistemas silvopastoriles. Fedegan. Bogotá. Colombia, pp 43-46