



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO



**MAESTRÍA EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE**

**SECUESTRO DE CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES
EN LA REGIÓN CAFETALERA DE CHOCAMÁN-TOTUTLA-
HUATUSCO, VERACRUZ.**

Tesis

**Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERIA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

Presenta:

WILLIAM ESPINOZA DOMINGUEZ

Chapingo, Estado de México, Noviembre de 2009.

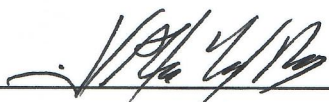


**SECUESTRO DE CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES EN LA
REGIÓN CAFETALERA DE CHOCAMÁN-TOTUTLA-HUATUSCO,
VERACRUZ.**

Tesis realizada por, **William Espinoza Domínguez**, bajo la dirección del comité asesor indicado; aprobado por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERIA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

DIRECTOR: 
DR. LASKMI REDDIAR KRISHNAMURTHY

ASESOR: 
M.C. JOSE ANTONIO TORRES RIVERA

ASESOR: 
DR. JOSE ANTONIO VAZQUEZ ALARCON

**SECUESTRO DE CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES EN LA
REGIÓN CAFETALERA DE CHOCAMÁN-TOTUTLA-HUATUSCO,
VERACRUZ.**

Tesis realizada por, **William Espinoza Domínguez**, bajo la dirección del comité asesor indicado; aprobado por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERIA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

DIRECTOR: _____

DR. LAKSMI REDDIAR KRISHNAMURTHY

ASESOR: _____

M.C. JOSE ANTONIO TORRES RIVERA

ASESOR: _____

DR. JOSE ANTONIO VAZQUEZ ALARCON



Dedicatória

Con cariño para mis padres, hermanos y familiares...

Con amor para mi esposa....



Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haberme brindado el apoyo de beca para cursar la maestría.

A mi alma mater la Universidad Autónoma Chapingo.

A Dr. Laksmi Krishnamurthy Reddiar por su capacidad y experiencia científica fundamentales para la concreción de este trabajo y por la dirección de esta investigación.

Al M.C. Antonio Torres Rivera por las facilidades dadas en el trabajo de campo realizado en Huatusco Veracruz, en el desarrollo de esta investigación y por sus valiosas sugerencias y acertados aportes durante el trabajo.

Al Dr. Antonio Vázquez Alarcón, por sus acertadas observaciones y el apoyo brindado.

A Ing. Julio por el apoyo brindado en la parte metodológica de este estudio, por su disposición y desinteresada ayuda.

Al Ing. Arturo Peralta por sus oportunas observaciones y su total disposición para el desarrollo de esta investigación.

A mi esposa, la M. C. Rosario Isabel Gabriel López, por su apoyo, comentarios y sugerencias. Pero sobre todo por su cariño, comprensión y constante estímulo brindado.

Gracias



Datos biográficos

William Espinoza Domínguez nació el 6 de febrero de 1982. Hijo primogénito. Creció en el seno de una familia cañera. Donde surge su inquietud y deseo de desarrollo del campo mexicano.

Realizó sus estudios de nivel medio superior él en Centro de Bachillerato Técnico Agropecuario número 17, en el municipio de Úrsulo Galván, Veracruz.

En el año 2001 ingresó a la universidad Autónoma Chapingo en donde cursó la carrera de Ingeniero en Agroecología. Desde el verano de 2004 se dedicó a impartir cursos de agricultura orgánica en zonas marginadas del país como Chiapas, Oaxaca, Veracruz y Querétaro. Desarrolló trabajos de agricultura orgánica en la zona rural del Distrito Federal.

En el 2005 capacitó a grupo de jóvenes y mujeres en huertos familiares en Santa María Chimalapas Oaxaca. Para el año 2006 fue galardonando con el premio nacional al Servicio Social Comunitario.

La primavera del 2007 ingresó a la Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible.

Secuestro de Carbono en Sistemas Agroforestales en la Región Cafetalera de Chocamán-Totutla-Huatusco, Veracruz.

Carbon sequestration in agroforestry systems in the coffee region of Chocamán-Totutla-Huatusco, Veracruz.

Espinoza-Domínguez W.; Krisnamurthy L.

RESUMEN

Los bosques son los principales sumideros terrestres de CO₂, sin embargo, los sistemas agroforestales (SAF) pueden desempeñar un importante papel no solo capturando y almacenando carbono, sino a su vez convirtiéndose en una alternativa tecnológica que puede reducir las tasas de deforestación en zonas tropicales y ofertar múltiples productos y servicios a las comunidades que los implementen (Schroeder, 1994).

El presente estudio se realizó en la región cafetalera del municipio de Huatusco, Veracruz. Se estimaron los reservorios de carbono en biomasa viva, materia orgánica muerta y materia orgánica del suelo, existentes en sistemas agroforestales de: Café-Plátano, Café-Macadamia, Café-Cedro rosado, Café-Ganado Ovino, Café-Chalahuite; en un sistema natural de Bosque primario y en un Potrero.

La técnica de recolección de muestras se realizó en parcelas de 4 x 25 m (100 m²) al azar, en el cual se midieron todos los árboles de 2.5-30 cm de DAP. En la misma área se muestreó biomasa de vegetación herbácea en cuadrantes de 1 x 1 m. Para la colecta del mantillo se tomó la muestra en un cuadrante de 0.50 x 0.50 m. Se colectaron muestras de suelo para la determinación de materia orgánica y densidad aparente. El contenido de carbono se calculó en un 45% de la cantidad de la biomasa estimada.

El sistema agroforestal que presentó la mayor cantidad de carbono aéreo, fue el tratamiento Café+Cedro rosado (Ca+Ce) con 114.71 t C/ha-1. Seguidos de este, se presentan de mayor a menor los siguientes sistemas: Café-Macadamia (Ca+Ma) con 34.76 t C/ha-1, Café-Chalahuite (Ca+Ch) con 30.64 t C/ha-1, Café-Plátano (Ca+Pl) con 27.91 t C/ha-1 y por último al sistema Silvopastoril (Sp) con 3.29 t C/ha-1.

El tratamiento Ca+Pl fue el que presentó mayor contenido de carbono en el suelo con 69.5 t C/ha-1, y el menor fue el tratamiento Potrero (P) con 47.36 t C/ha-1. El bosque primario es el sistema que más guarda carbono con un total de 467.2 t C/ha-1, representando el 76% del total que tiene el sistema.

En cuanto al Carbono Base Total de los sistemas evaluados se encontró que el Tratamiento Ca+Ce presenta el mayor valor con 220.69 t C/ha-1, mientras que el tratamiento Sp presenta el menor, con 55.4 t C/ha-1.

De los sistemas evaluados se concluye que, en promedio los SAF's secuestran 115.93 t C/ha-1, Potrero 50 t C/ha-1 y el bosque es el que retiene mas carbono con 467.2 t C/ha-1.

Los escenarios sugeridos de fijación de carbono nos muestran que los SAF, retienen mas carbono que los monocultivos de cada especie y mostrar que los SAF se asemejan al secuestro de carbono de un bosque natural, mientras que los sistemas convencionales de producción al ser más destructivos, y contar con una sola especie, secuestran el mínimo.

Palabras clave: Secuestro de carbono, sistemas agroforestales, café, cedro rosado, plátano, chalahuite, bosque, potrero.

ABSTRACT

Forests are the main terrestrial sinks for CO₂, however, Agroforestry Systems (SAF) can play an important role not only capturing and storing carbon, but at the same time becoming an alternative technology that can reduce rates of deforestation in tropical and offer multiple products and services to communities that implement (Schroeder, 1994).

The present research was conducted in the coffee region to municipality of Huatusco. We estimated carbon pools in living biomass, dead organic matter and soil organic matter, existing in agroforestry systems: Coffee-Banana, Coffee-Macadamia Coffee-Cedar Pink, Coffee-Sheep, Coffee-Chalahuite; in one system natural primary forest and one pasture.

The sampling technique consisted of data collection in a quadrant of 4 x 25 m (100 m²) at random, which were measured all trees 2.5-30 cm DAP. In the same area of herbaceous vegetation biomass sampling in quadrants 1 x 1 m. For the collection of litter sample was taken in one quadrant of 0.50 x 0.50 m. Soil samples were collected for determination of organic matter and bulk density. The carbon content was estimated at 45% of the amount of the estimated biomass.

The agroforestry system that presented the most carbon-air treatment was Coffee-Cedar pink (Co+Ce) to 114.71 t C/ha-1. Followed by this, are presented from most to least the following systems: Coffee-Macadamia (Co+Ma) to 34.76 t C/ha-1, Coffee-Chalahuite (Ca+Ch) with 30.64 t C/ha-1, Coffee-Banana (Co + Ba) with 27.91 t C/ha-1 and finally to the Silvopastoral system (Sp) with 3.29 t C/ha-1.

The treatment was the Ca +Ba showed higher carbon content in soil with 69.5 t C/ha-1, and the youngest was the treatment Pasture (P) with 47.36 t C/ha-1. Primary forest is the system that stores carbon for a total of 467.2 t C/ha-1, representing 76% of the total in the system.

As Base Carbon Overall researched of systems found that Ca+Ce treatment has the highest value 220.69 t C/ha-1, while the treatment SP has the lowest treatment with 55.4 t C/ha-1. Of the systems evaluated is concluded that, on average of carbon sequestration in agroforestry system is 115.93 t C/ha-1 in the Pasture is 50 t C/ha-1, and the forest is the most carbon retaining is 467.2 t C/ha-1.

The suggested scenarios of carbon fixation show that the SAF, hold more carbon than monocultures of each species and show that the SAF are similar to carbon sequestration from a natural forest, while the conventional systems of production to be more destructive and have a single species sequestration the minimum.

Key words: carbon sequestration, agroforestry systems, coffee, cedar pink, banana, chalahuite, forests, pasture.

CONTENIDO

PÁGINA

RESUMEN.....	vi
ABSTRACT	vi
CONTENIDO	vii
INDICE DE CUADROS.....	ix
INDICE DE FIGURAS.....	x
I. INTRODUCCION	1
II. OBJETIVOS	4
2.1. Objetivo general	4
2.2. Objetivos específicos	4
III. HIPOTESIS.....	5
IV. MARCO TEORICO	6
4.1. Cambio climático	6
4.1.1 Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto.	7
4.2. Secuestro de carbono.....	8
4.2.1. El CO ₂ en la atmósfera.....	9
4.3. Emisiones de gases de efecto invernadero	10
4.3.1. Combustibles fósiles	12
4.3.2. Secuestro de carbono en el sector forestal	13
4.4. La Agroforestería como una opción de desarrollo	13
4.4.1. Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales	15
4.5. Producción de café en México	17
4.5.1. Crisis cafetalera.....	19
V. MATERIALES Y MÉTODOS	21
5.1. El área de estudio	21
5.1.1. Localización	21
5.1.2. Extensión territorial.....	23
5.1.3. Clima	23
5.1.4. Vegetación	23
5.1.5. Hidrografía	23
5.1.6. Orografía	23
5.2 Selección de parcelas	24
5.3. Los Sistemas Agroforestales determinados tratamientos	24
5.3.1. Tamaño de muestra	26
5.4. Estimación de reservorios de Carbono.....	27
5.5. Carbono en biomasa viva (BV).....	29
5.4.2. Carbono en materia orgánica muerta (MOM).....	31
5.4.3. Carbono de la materia orgánica del suelo (MOS).....	32
5.5. Definición de línea base y escenarios de captura de carbono	Error! Marcador no definido.
vi. RESULTADOS.....	35

6.1. Descripción de los sitios de muestreo	35
6.1.1. Silvopastoril	36
6.1.2. Bosque caducifolio.....	37
6.1.3. Café-Chalahuite.....	38
6.1.4. Café- Macadamia	39
6.1.5. Café- Cedro rosado	39
6.1.6. Café plátano	39
6.2. Caracterización de la actividad cafetalera.....	39
6.3. Secuestro de carbono en Sistemas Agroforestales.....	40
6.2.1. Carbono arbóreo.....	41
6.4. Carbono herbáceo	43
6.5. Carbono en hojarasca	43
6.6. Carbono total de la biomasa aérea	44
6.7. Fijación de carbono subterráneo por sistema de uso de suelo	45
6.8. Carbono base total por sistema evaluado	46
6.9. Escenarios sugeridos de fijación de carbono	46
VII. DISCUSIÓN	48
VIII. CONCLUSIONES.....	53
IX. BIBLIOGRAFIA	54
X. ANEXOS	64

INDICE DE CUADROS

PÁGINA

Cuadro 1. Características de los Principales Gases de Invernadero, Según Goudie (1990).	9
Cuadro 2. Actividades por Sector Industrial que Contribuyen a la Emisión de Gases de Invernadero y Tipo de Gases.	12
Cuadro 3. Localización Geográfica de los Sistemas Agroforestales en Base a Café, Silvopastoril y Natural Evaluados en Huatusco, Veracruz.....	25
Cuadro 4. Modelos Alelométricos Empleados en la Estimación de Biomasa Arbórea y Arbustiva, en Sistemas Agroforestales de Café Bajo Sombra.	29
Cuadro 5. Modelos Alelométricos para Estimar la Biomasa Sobre el Suelo del Componente Leñoso con Datos de Inventarios Forestales.	30
Cuadro 6. Cantidad de Carbono Secuestrado (t C ha ⁻¹) en Árboles Vivos y Muertos Según Sistema Agroforestal de Uso del Suelo en Huatusco, Veracruz.	41
Cuadro 7. Cantidad de Carbono Secuestrado (t C ha ⁻¹) en Arbustos y Hierbas Según Sistema Agroforestal de Uso del Suelo en Huatusco, Veracruz.	43
Cuadro 8. Cantidad de Carbono Secuestrado (t C ha ⁻¹) en Hojarasca según Sistema Agroforestal de Uso del Suelo en Huatusco, Veracruz.	44
Cuadro 9. Cantidad Total de Carbono Secuestrado (t C ha ⁻¹) en Árboles, Arbustos y Hierbas según Sistema Agroforestal de Uso del Suelo en Huatusco, Veracruz.	45
Cuadro 10. Carbono Base Subterráneo para Diferentes Sistemas de Cobertura En Huatusco, Veracruz.....	45
Cuadro 11. Cálculo de Carbono Base Total para Diferentes Sistemas de Cobertura en Huatusco, Veracruz.	46

INDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. Localización del municipio de Huatusco, Veracruz, México.....	22
Figura 2. Tamaño de las parcelas de muestreo.....	26
Figura 3. Estimación de reservorios de carbono. a) Levantamiento de parcela para estimación de biomasa arbórea en un Sistema Silvopastoril. b). Subparcela de 0.25 m ² , y 0.0625 m ² para cuantificación de biomasa herbácea y hojarasca. c). Muestreo de hierbas d). Muestreo de suelo para cuantificación de materia orgánica.....	28



I. INTRODUCCION

Las emisiones de gases con efecto invernadero (GEI) en la atmosfera de la tierra, tienen origen en la quema de combustibles fósiles y oxidación de la biomasa residual, producto de cambios en el uso del suelo por procesos de deforestación en selvas tropicales (Jaramillo, 2004), esto con el fin de establecer actividades agrícolas y pecuarias. Según Garduño (2004), el bióxido de carbono (CO_2) es uno de los principales gases que contribuye al incremento de la temperatura atmosférica, por su capacidad de absorber radiaciones electromagnéticas de longitudes de onda larga. Estos incrementos de temperatura actúan directamente en el comportamiento de la precipitación anual, alterando los ciclos productivos de las diferentes especies animales y vegetales que se producen en la zona de estudio.

Una forma de mitigar los efectos que genera el CO_2 además de reducirlo es capturarlo y mantenerlo el mayor tiempo posible en la biomasa y el suelo (De Jong *et al.*, 2004). Montoya *et al.* (1995), afirman que, a través de la fotosíntesis, la vegetación asimila CO_2 atmosférico, forma carbohidratos y gana volumen. En la superficie terrestre, los bosques del mundo capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema y participan con el 90% del flujo anual de carbono de la atmósfera y de la superficie de la tierra.

Montoya (1995) y Ordóñez (1998), describen que, con el manejo forestal es posible compensar las crecientes emisiones de CO_2 en dos formas:

a) Creando nuevos reservorios de bióxido de carbono. Restaurando las áreas degradadas por medio de plantaciones y/o regeneración natural, y por la extracción de madera. En ambos casos se pretende almacenar el carbono a través del crecimiento de árboles y al extraer la madera, convertirla en productos durables. El carbono acumulado se mantendrá durante la vida útil del producto. Al extraer la madera, la regeneración actuará almacenando carbono



por el crecimiento. Los sistemas forestales y agroforestales pueden capturar en sus diferentes almacenes de 80 a 350 t C ha⁻¹.

b) Protección de bosques y suelos. Con la destrucción del bosque se pueden liberar a la atmósfera de 50 a 400 t de carbono por hectárea. Mencionan que "...Mientras la protección de un área forestal puede inducir a la presión de otra, el manejo integrado de recursos enriquecido con esquemas de evaluación de proyectos son requeridos para validar dicha protección..." , no obstante, los aspectos técnicos pierden su efectividad si no participa la población, es decir, tanto los dueños de los recursos como los que consumen los productos derivados del bosque.

Los bosques son los principales sumideros terrestres de CO₂, sin embargo, los sistemas agroforestales (SAF) pueden desempeñar un importante papel no solo capturando y almacenando carbono, sino a su vez convirtiéndose en una alternativa tecnológica que puede reducir las tasas de deforestación en zonas tropicales y ofertar múltiples productos y servicios a las comunidades que los implementen. Se estima que los SAF almacenan 9, 21, 50 y 63 Mg C ha⁻¹ en regiones semiáridas, subhúmedas, húmedas y templadas, "respectivamente". El potencial de almacenamiento de C se estima entre 12 y 228 Mg C ha⁻¹ (Schroeder, 1994). Basado en una evaluación preliminar de sumideros globales de carbono terrestre, Dixon (1995) argumenta que hay dos atributos benéficos de los sistemas agroforestales: primero, almacenamiento directo y temporal de carbono en árboles y suelos; y segundo, el potencial de remediar las emisiones de gases de invernadero asociados con la deforestación y la agricultura roza-tumba-quema. El estimó que en las latitudes tropicales, en una hectárea de sistemas agroforestales puede proveer bienes y servicios para contrarrestar los efectos de la deforestación de 5-20 ha. La magnitud de almacenamiento de carbono por sistemas agroforestales puede variar en diferentes zonas climáticas.



Bajo una adecuada política de apoyo, el sector forestal en nuestro país tiene la capacidad de reducir el crecimiento de las emisiones de CO₂ generadas por el sector energético, convirtiéndose en una de las opciones de mitigación más importantes a corto y mediano plazo. Estas opciones forestales de mitigación bien instrumentadas, pueden fortalecer el proceso de desarrollo rural sustentable del país, donde puede ser un complemento a las estrategias de reducción de emisiones en el sector de energía. El manejo selectivo de selvas, puede realizar un manejo sostenible que permita mantener la productividad de las selvas a largo plazo.

En México son pocos los trabajos de investigación que se han hecho sobre captura de carbono. Algunos de ellos realizados en sistemas agroforestales, como: manejo de café bajo sombra en Chiapas (Aguirre, 2006) y sistemas agroforestales a base de cítricos en el trópico húmedo mexicano (Rajagopal, 2004).

Debido a la importancia de la zona de Huatusco en la producción de café (*Coffe arábica* L.), es necesario contar con información que pueda aportar datos referentes al potencial de mitigación de carbono que se tiene en los sistemas de café asociados a plantaciones de cultivo, donde se pueda entrar en un esquema de pago por servicios ambientales en la modalidad de captura de carbono.

El presente trabajo fue dirigido hacia la evaluación del carbono secuestrado y almacenado en las combinaciones agroforestales de café con especies de valor económico.



II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- Aportar información sobre el potencial de secuestro de carbono en sistemas agroforestales en base a café, en la región cafetalera de Chocamán-Totutla-Huatusco, Veracruz.

2.2. Objetivos específicos

- Estimar los reservorios de carbono en biomasa viva, materia orgánica muerta y materia orgánica del suelo, existente en sistemas agroforestales de: Café+Plátano, Café+Macadamia, Café+Cedro rosado, Café+Ganado bovino, Café+Chalahuite; Bosque primario y Potrero.
- Comparar el potencial de secuestro de carbono de los sistemas agroforestales en base a café con respecto al Bosque primario y al Potrero típico de la región.



III. HIPOTESIS

- El bosque primario secuestra más carbono que cualquier sistema agroforestal a base de café y estos a su vez más que los potreros típicos de la región.



IV. MARCO TEORICO

En el siguiente apartado se darán los aspectos generales sobre secuestro de carbono. Además, se incluye información sobre algunas investigaciones en sistemas agroforestales.

4.1. Cambio climático

La atmósfera, por el hecho de ser muy transparente para la luz visible pero mucho menos para la radiación infrarroja, produce para la superficie terrestre el mismo efecto que el techo de cristal produce en un invernadero; la luz solar, que llega sin grandes obstáculos hasta el suelo, lo calienta, dando lugar a que emita rayos infrarrojos (ondas caloríficas), los cuales, a diferencia de los rayos de luz, son absorbidos en gran parte por el vidrio o la atmósfera. Al final la cantidad de energía emitida al espacio tiene que ser la misma que la absorbida, pero la superficie terrestre tiene que alcanzar la temperatura en que ambos flujos se equilibran, la cual es más alta en presencia de una atmósfera (en un planeta) o de techos de cristal (en un invernadero; aunque en realidad el cristal de un invernadero protege de la pérdida de calor más porque interrumpe la circulación del aire, que porque sea opaco a los rayos infrarrojos). El efecto invernadero se está viendo acentuado por la emisión de ciertos gases debidos a la actividad humana, como el dióxido de carbono y el metano, que está produciendo un calentamiento en la Tierra. Hay un consenso prácticamente unánime en la comunidad científica sobre que este calentamiento se está produciendo por esta causa¹.

En las últimas décadas el calentamiento global generado por el incremento y acumulación de gases efecto de invernadero (GEI) en la atmósfera tiene mayor relevancia en las altas esferas de los gobiernos mundiales.

¹ En línea 25/08/2009: http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_invernadero



Los efectos del cambio climático podrían tener serias implicaciones en el futuro para la agricultura, la forestaría y la pesca como resultado de alterar los ciclos biogeoquímicos y de la constante pérdida de la biodiversidad (Vitousek, 1994).

De acuerdo a las predicciones de científicos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2002), los principales impactos del calentamiento global son:

- 1) Incremento en la temperatura media del planeta
- 2) Cambios en los regímenes de precipitación en diversas regiones del mundo,
- 3) Aumento en el número de tormentas tropicales e inundaciones,
- 4) Retiradas generalizada de las capas de hielo polar y no polar, y aumento en el nivel medio del océano (fusión de los glaciares y capas de hielo del Ártico y el Antártico),
- 5) Reducción en la disponibilidad y calidad de alimentos,
- 6) Alteración de la productividad ecológica y la diversidad con riesgo creciente de modificación de hábitats y extinción de especies vulnerables,
- 7) Escasez de agua en muchas zonas del mundo y reducción de las reservas de agua potables disponible,
- 8) Disminución en los volúmenes de cosechas y
- 9) Cambios negativos en el sector comercial, medidos por cambios en el producto interno bruto (PIB) de naciones principalmente de escasos recursos y/o en vía de desarrollo.

4.1.1 Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto.

Con el fin de hacer frente al cambio climático, las naciones en pleno producto de la Cumbre de Río realizada en Brasil en el año de 1992, tomaron la decisión de emprender medidas relevante que permitieran en el mediano y largo plazo, regular y reducir las concentraciones de GEI y de esta manera estabilizar y mitigar los posibles impactos sobre los ecosistemas, el hombre y el sistema socioeconómico por un cambio abrupto del sistema climático global.



Para efectos se creó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC) la cual tiene como objetivo “La estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema global; ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permita que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible” (Organización de las Naciones Unidas, 1992).

El Protocolo de Kyoto, pide a los países industrializados incluidos en el Anexo I, excepto los Estado Unidos que no participan, reduzcan sus emisiones de GEI en aproximadamente un 5% por debajo de los niveles de 1990 para el periodo 2008 – 2012. El Protocolo de Kyoto, permite que los participantes deduzcan las emisiones en sus países de origen y/o beneficiarse de los llamados mecanismos flexibles (Comercio de Emisiones, la Aplicación Conjunta y el Desarrollo Limpio) así como contabilizar el carbono capturado por los llamados sumideros como los bosques o las tierras de cultivos (UNFCCC, 1997).

4.2. Secuestro de carbono

El CO₂ atmosférico es incorporado a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis. Este CO₂ participa en la composición de todas las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse (follaje, ramas, raíces y tronco). Al crecer, éste incrementa su follaje, ramas, flores, frutos y yemas de crecimiento (que en su conjunto conforman la copa) así como su altura y el grosor de su tronco. La copa necesita espacio para recibir energía solar sobre las hojas, lo que da lugar a que las copas de los árboles compitan por esta energía. Esto origina, a su vez, un dosel cerrado. Los componentes de la copa aportan materia orgánica al suelo, que al degradarse se incorpora



paulatinamente y da origen al humus estable, éste, a su vez, aporta nuevamente CO₂ al entorno (Masera, 1995).

Simultáneamente, los troncos al ir aumentando su diámetro y altura alcanzarán un tamaño aprovechable en términos comerciales, pudiéndose extraer productos como tablas, tablonos y polines, que darán origen a subproductos elaborados, como muebles y casas. Estos productos finales tienen un tiempo de vida determinado, después del cual se degradan aportando CO₂ al suelo y/o a la atmósfera. Durante el tiempo en que el CO₂ se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol —y hasta que es enviado nuevamente al suelo o a la atmósfera—, se considera almacenado. En el momento de su liberación (ya sea por la descomposición de la materia orgánica y/o por la quema de la biomasa) el CO₂ fluye para regresar al ciclo del carbono (Masera, 1995).

4.2.1. El CO₂ en la atmósfera

Goudie (1990), encontró que la concentración de 353,000 ppb⁽¹⁾ del dióxido de carbono (CO₂) en 1990, resultó 25% mayor que en la etapa preindustrial (1750-1800), cuyo valor era de alrededor de 280,000 ppb⁽¹⁾, y por arriba, a su vez, de cualquier periodo durante los últimos 160,000 años (Cuadro 1).

Cuadro 1. Características de los principales gases de invernadero según Goudie (1990).

Gas	Fuentes antropogénicas	Concentración (ppb) ^[1]		Incremento anual de la concentración	Tiempo de residencia en la atmósfera (años)
		Preindustrial	Actual		
Co ₂	Uso de combustibles fósiles y leña, deforestación	275	353	0.50%	50-200
CH ₄	Cultivo de arroz, ganado, tiraderos de basura, uso de combustibles fósiles	800	1.72	0.90%	10



NO ₂	Fertilizantes químicos, deforestación, uso de leña.	295	310	0.20%	150-180
CFC	(Clorofluorocarbono) Aerosoles, refrigerantes, aislantes	0	3	5%	65-130

[†] Partes por billón

Por su parte, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 1995) estima que un cambio de las emisiones de gases de efecto invernadero que duplique las concentraciones de CO₂ con respecto al nivel preindustrial daría como resultado un incremento de temperatura de 1.5 a 3.5 °C. Este cambio de temperatura provocaría, a su vez:

- i) cambios en los patrones mundiales de precipitación pluvial, con diferencias regionales significativas.
- ii) elevación del nivel del mar de 0.2 a 0.6 m, tanto por la expansión térmica de los océanos como por el derretimiento parcial de glaciares en las montañas y de la capa de hielo en las regiones polares, como el caso de la Antártica, para la que se estima un desprendimiento de 200 km de masas de hielo.
- iii) cambios en la humedad del suelo al aumentar la evaporación del agua.

Estos tres factores afectarían directamente todas aquellas actividades humanas que dependen de la precipitación, la temperatura, la humedad y de los cuerpos de agua. El producto de esta alteración sería equivalente a desplazar una región cualquiera en 200 Km. de latitud, lo que provocaría por ejemplo, la migración de las comunidades de las zonas costeras al interior de los continentes y cambios en el uso del suelo, entre otros factores, con las consiguientes crisis de tipo social, económico y político (Masera, 1995).

4.3. Emisiones de gases de efecto invernadero

En la actualidad el contenido de CO₂ en la atmósfera a aumentado año con año y sin duda, seguirá subiendo en el futuro. Según los sondeos hechos en el hielo



antártico, la concentración del CO₂ oscilaba entre 180 y 280 partes por millón (ppm) durante los pasados 420.000 años, pero solamente en los pasados 50 años aumentó en 30% para llegar a un nivel sin precedentes de 380 ppm. (Petit, *et al.*, 1999).

En 1990, producto de la segunda conferencia mundial sobre el clima, proponen la convención Marco sobre el cambio climático, donde se consideran el grado de desarrollo y subsecuente contribución de poluentes, en la cumbre de la Tierra en "Río 1992", se realizaron monitoreos y los países industrializados firmaron un compromiso donde adoptarían las medidas necesarias para reducir las emisiones de GEI a sus niveles de 1990, creándose así el llamado protocolo de Kyoto.

Uno de los principios fundamentales del Protocolo de Kyoto es que los proyectos de mitigación deben generar cambios importantes y de largo plazo en el almacén de carbono terrestre y en la disminución de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera (IPCC 1995).

Diferentes autores (Schneider 1989; Houghton y Woodwell, 1989; Lashof y Ahuja 1990) afirman que el dióxido de carbono (CO₂) es uno de los GEI más importantes y que su emisión a la atmósfera por el cambio en el uso del suelo ocupa el segundo lugar a nivel mundial con una fuerte contribución de las zonas tropicales. La deforestación mundial anual se calcula en 17 millones de hectáreas, lo que significa una liberación anual de cerca de 1.8 GtC³; lo que representa el 20% de las emisiones antropogénicas totales (IPCC, 1992 y 1995; Montoya *et al.*, 1995).

Específicamente para México, este fenómeno es de singular importancia pues, por un lado, se encuentra entre los 20 países con mayores emisiones de estos gases y por el otro, se encuentra entre las regiones más vulnerables a los impactos asociados al cambio climático debido a sus condiciones bioclimáticas



y socioeconómicas (Villers y Trejo, 1997; Ordóñez, 1998; Gay, 2000; Diario el Milenio, 2001).

4.3.1. Combustibles fósiles

El uso de combustibles fósiles y el cambio en el uso del suelo son considerados a nivel mundial como las dos principales fuentes netas de CO₂ a la atmósfera relacionadas con el cambio climático global (Mintzer, 1992).

Las diversas actividades actuales humanas han dado por resultado el aumento de las emisiones de gases, trayendo un aumento en partículas que generan un efecto invernadero en la atmósfera (Cuadro 2).

Cuadro 2. Actividades por sector industrial que contribuyen a la emisión de gases de invernadero y tipo de gases.

Actividad	Gas emitido
Sector energético	
Producción de carbono	CH ₄
Combustión de carbono	CO, CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
Combustión de petróleo	CO, CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
Combustión de gas	CO, CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
Ventilación y fugas de gas	CH ₄
Sector agrícola, ganadero y forestal	
Ganadería intensiva	CH ₄
Cultivos de arroz	CH ₄
Uso de fertilizantes	N ₂ O
Combustión de biomasa	CO, CO ₂ , N ₂ O
Deforestación y cambio de uso del suelo	CO ₂ , N ₂ O
Sector industrial	
Producción de cemento, metalurgia	CO ₂
Uso de CFC	CFC
Relleno sanitario y otros procesos industriales	CH ₄

Fuente: tomado de Masera, 1995.



4.3.2. Secuestro de carbono en el sector forestal

Los ecosistemas forestales pueden absorber cantidades significativas de bióxido de carbono (CO₂), principal GEI. En las últimas décadas ha surgido un interés considerable por incrementar el contenido de C en la vegetación terrestre mediante la conservación forestal, la reforestación, la agroforestería y otros métodos de manejo del uso de suelo. Gran número de estudios han demostrado el gran potencial que poseen los bosques y los agroecosistemas para almacenar carbono.

Organizaciones a nivel mundial como The World Bank (WB), The World Conservation Union (IUCN) y la UNEP, han resaltado que los bosques y las actividades de manejo sustentable de uso del suelo como la Agroforestería, administradas bajo el Protocolo de Kyoto son pertinentes social y ambientalmente como estrategia de mitigación.

4.4. La Agroforestería como una opción de desarrollo

Dentro de este contexto, México tiene posibilidades reales para fomentar cambios de uso de suelo, de usos tradicionales o monocultivo, ya que al convertirlos en sistemas agroforestales se incrementa su capacidad fijadora de carbono. Por lo que es necesario realizar mayores investigaciones para generar las bases tecnológicas y científicas que garanticen el conocimiento real de las posibilidades que la Agroforestería brinda como servicio ambiental para la fijación de carbono atmosférico.

La Agroforestería es una aproximación interdisciplinaria a los sistemas de uso de la tierra implica tener conciencia de las interacciones y la retroalimentación entre hombre y el ambiente, entre la demanda de recursos y su existencia en una determinada área, lo cual bajo ciertas condiciones requiere optimización y manejo substancial más que el incremento permanente de la explotación (Krishnamurthy y Ávila, 1999).



La cantidad de C secuestrada al año directamente por los árboles dentro de diferentes sistemas agroforestales va normalmente de 3 a 25 t C ha⁻¹ y en el caso del Tungya y los huertos caseros, estos superan las 50 t C ha⁻¹. Las cortinas rompevientos, los arboles en linderos y los cercos vivos están en la parte baja de dicho rango (Kurstén y Burschel, 1993).

El potencial de los sistemas agroforestales (SAF) para captura de C, ha sido evaluado por diferentes autores (Dixon, 1995; De Jong, 2000; Orlando *et al.*, 2002; Montagnini y Nair, 2004). De acuerdo con el Centro Internacional de Investigación en Agroforestería "ICRAF" (Nair, 1993). Agroforestería se define como aquellos sistemas de uso de la tierra donde especies leñosas perennes se usan y manejan deliberadamente junto con cultivos agrícolas y/o animales y donde las interacciones ecológicas y económicas entre componentes surgen de los arreglos espaciales y/o temporales.

Los SAF's juegan un importante papel al proveer diferentes rangos de productos (leña, madera para construcción, frutos, plantas comestibles, aceites, resinas, gomas, forraje) y servicios (control de malezas, captura de carbono, fijación biológica de nitrógeno, conservación del agua, suelo y su fertilidad, regulación térmica e hidrológica, conservación de biodiversidad) (Krishnamurthy y Ávila, 1999).

La Agroforestería tiene como objetivos principales aumentar la oferta y el rendimiento de los productos obtenidos, así como mantener la fertilidad del recurso suelo para mejorar el nivel de vida de los productores.

Los impactos positivos de la Agroforestería se pueden traducir en: búsqueda de la seguridad alimentaria en las comunidades rurales, autosuficiencia productiva, conservación de recursos naturales, reducción de la presión y degradación de ecosistemas naturales, organización comunitaria a través de procesos de autogestión (Nair, 1993). El principio básico es validar y maximizar los beneficios de las interacciones entre suelo, plantas, animales, medio ambiente y



hombre por medio de prácticas adecuadas, que hagan frente a la problemática en una comunidad o región.

4.4.1. Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales

Los sistemas agroforestales pueden ser importantes reservorios de carbono en el tiempo, dependiendo de: a) la productividad que posean, b) la finalidad para la cual hayan sido diseñados y c) las condiciones ambientales bajo las cuales se desarrollan; asimismo el almacenamiento de carbono secuestrado en la biomasa viva y la materia orgánica del suelo (MOS) juegan un importante rol dentro de esta dinámica (Oelbermann *et al.*, 2004). La acumulación de carbono secuestrado es más evidente en la biomasa viva presente en árboles y arbustos, los rangos de almacenamiento de C en la biomasa viva dependen principalmente del número de árboles presentes (Montagnini y Nair, 2004).

De acuerdo con Young (1997), la producción de materia seca en la biomasa aérea en diferentes SAF y regiones ecológicas varía desde $2.3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a $48 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, dependiendo del número de componentes, estratos y arreglos espaciales y temporales; asimismo la producción de biomasa subterránea (raíces) puede variar de $1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a $4.5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

La mitad del carbono asimilado es eventualmente transportado para crecimiento de las raíces y parte es transferido al suelo vía exudado de raíces vivas y materiales orgánicos muertos, sujetos a procesos de descomposición por parte de microorganismos (Fassbender, 1993). Los principales factores que actúan sobre la evolución de la MOS y su estado de residencia, concierne al tipo de vegetación presente, ingreso de residuos, composición química de los materiales, factores climáticos (temperatura y humedad), propiedades del suelo como textura, contenido y mineralogía de arcillas y grado de acidez presente (Young, 1989).



Uno de los objetivos fundamentales de la Agroforestería es la gestión de la MO del suelo. La MOS como componente importante del suelo, provee de nutrientes a las plantas, estabiliza la estructura e incrementa la capacidad de intercambio catiónico (Schroth y Sinclair, 2003). La construcción de reservorios estables de MOS a través de prácticas adecuadas de manejo y conservación que permita la incorporación de materiales orgánicos al suelo (residuos vegetales producto de podas, compostas entre otros), permitiría no solo mejorar características fisicoquímicas, sino a su vez convertirlo en un importante reservorio de C en el proceso de mitigación.

Los SAF almacenan aproximadamente 9, 21, 50 y 63 Mg C ha⁻¹, en regiones semiáridas, subhúmedas, húmedas y templadas respectivamente, asimismo el almacenamiento de carbono total (Ct) se estima entre 12 a 228 Mg C ha⁻¹ (Schoeder, 1994). De acuerdo con Oelbermann *et al.* (2004), el potencial de almacenamiento de C en biomasa viva en SAF de zonas tropicales es de 2.1 x 10⁹ Mg C año⁻¹, mientras en zonas templadas es de 1.9 x 10⁹ Mg C año⁻¹.

Rajagolpa (2004) realizó un estudio en Tlapacoyan, Veracruz, en el cual estimó la cantidad de C almacenado en SAF de cítricos en diferentes arreglos espaciales y componentes (asocio café, plátano, potreros). Los sistemas cítrico+café+plátano, cítrico+café, cítrico+pastura y cítrico+plátano almacenaron 196, 186, 181, 144 Mg C ha⁻¹, respectivamente. El C contenido en la biomasa aérea osciló entre 41 y 75 Mg C ha⁻¹, la mayor cantidad se encontró en los árboles, el cual fue 5 veces mayor al C almacenado por arbustos y hierbas. La distribución del C en este reservorio mostró variaciones marcadas por el tipo de especies arbóreas, densidad, regímenes de manejo y edad de los sistemas.

El C en la MOS (materia orgánica del suelo) fue mucho mayor en comparación al C presente en la biomasa aérea, el almacenamiento osciló entre 101 y 129 Mg C ha⁻¹ a 0.3 m de profundidad, representando el 58 al 75 % del carbono total. Concluyo que los SAF con alto nivel de complejidad de estratos y especies arbóreas almacenan mayor cantidad de C, por lo tanto recomendó reforzar estudios para identificar el diseño de sistemas complejos y regímenes



de manejo apropiados a fin de capturar y mantener la mayor cantidad de C en diferentes condiciones biofísicas y socioeconómicas.

Otras experiencias de captura de carbono se han desarrollado por el proyecto Scolel té, en las regiones Tzeltales y Tzotziles del estado de Chiapas, estiman que el potencial de captura de carbono de sistemas agroforestales en zonas subtropicales y tropicales, puede oscilar entre 40 a 80 y 60 a 140 Mg C ha⁻¹ respectivamente (De Jong *et al.*, 1997b).

Callo (2001) en un estudio realizado en la Amazonia Peruana reporta, que la mayor cantidad de C se encuentra en el suelo. Sistemas como huerto casero, café bajo sombra y silvopastura almacenaron 196, 193 y 120 Mg C ha⁻¹ respectivamente, de los cuales más del 58 % se encontró en el suelo. Concluyó además que los árboles son también un importante reservorio (30% del Ct) después del suelo.

Ávila *et al.* (2001) realizaron evaluaciones sobre almacenamiento de C en cuatro SAF en suelos Andisoles de Costa Rica. Reportaron que el sistema que almacenó mas C fue café – *Erythrina poeppigiana* de 10 años (195 Mg C ha⁻¹), seguido de café – *Eucalyptus deglupta* de 8 años (169 Mg C ha⁻¹), *Brachiaria brizantha* – *Acacia mangium* de 3 años (96 Mg C ha⁻¹) y *B. brizantha* – *E. deglupta* de 3 años (95 Mg C ha⁻¹). Al comparar los reservorios de C de biomasa aérea y MOS a 0.25 m de profundidad, más del 90 % del C se encontró en este último. Concluyeron, que el suelo es el principal reservorio y que la cantidad de C almacenado en cada SAF dependen del clima, las condiciones edáficas y el manejo que se brinde al sistema.

4.5. Producción de café en México

Las regiones cafetaleras son relevantes tanto por su importancia social económica, cultural y ambiental. De los 12 estados cafetaleros del país, figuran como principales Chiapas, Veracruz, Oaxaca y Puebla. El café representa la actividad productiva más importante dentro del sector agropecuario nacional y



es el principal producto agrícola de exportación, se cultiva en 664,793.58 has distribuidas en 81,084 productores (UACH, 2005)

México es el cuarto país productor de café después de Brasil, Colombia y Vietnam, y el primer exportador de café orgánico a nivel mundial. En los años ochenta el café generó el 36 % del valor de las exportaciones agrícolas y ocupó el quinto lugar por superficie cosechada antecedido por el maíz, el frijón, el sorgo y el trigo. En los años 70, contribuyó con US \$ 100 millones a la economía, esta cifra fue cuadruplicada para 1976 y en 1994 generó divisas por US \$ 700 millones. Esta situación hizo del café uno de los principales cultivos de exportación del país (Nestel, 1995), como actividad agrícola ocupa cerca de 3 millones de personas en los procesos de producción y comercialización.

Asimismo es representativo que gran parte de las áreas de café se encuentran en regiones de alta biodiversidad de flora y fauna, designadas por la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO) como áreas prioritarias de conservación por el alto número de especies endémicas presentes y remanentes de extensas áreas de ecosistemas de selvas altas y medianas, selvas bajas caducifolias, bosques de encinos y bosques mesófilos de montaña (Moguel y Toledo, 1996; Moguel y Toledo, 1999).

La producción de café en México a diferencia de los sistemas altamente tecnificados en países como Brasil y Colombia, se realiza en sistemas tradicionales, caracterizados por la presencia de un dosel de árboles diverso. Estructural y florísticamente ofertan gran número de productos (madera, leña, frutos, plantas comestibles y medicinales) y servicios (conservación de suelos, regulación hidrológica, captura de carbono, conservación de biodiversidad) (Pohlan, 2002; Perfecto *et al.*, 1996; Perfecto *et al.*, 2005).

El sistema policultivo comercial parte de la eliminación total de la cobertura forestal y la introducción de especies con buenos atributos de sombra para el café y generación de productos; para tal fin se emplean especies como *Inga*



spp, caucho (*Castilla elastica*), cedro (*Cedrela mexicana*), cítricos, plátano, pimienta, guayaba entre otros.

4.5.1. Crisis cafetalera

En el año 1989, desacuerdos comerciales entre los países miembros de la Organización Internacional del Café generan la ruptura del pacto cafetero a nivel mundial y su ingerencia en la regulación de cuotas y bandas de precios. Esta crisis llevo a la liberalización del mercado que trajo como consecuencia una abrumadora caída del precio internacional del café, respecto a los precios registrados en los años 80 y parte de los 90. La situación llego a ser tan crítica que los precios de venta no solventaban los costos de producción.

Además, se suman otros aspectos de importancia que ahondan hoy la crisis del café en el mundo (Gresser y Tickell, 2002):

1. Distribución inequitativa de los beneficios generados en la cadena productiva, donde las grandes multinacionales y tostadoras obtienen los mayores márgenes de ganancia respecto a los pequeños productores.
2. Reducción en la calidad de café y generalización de mezclas estandarizadas que conlleva a una caída del precio, donde las compañías procesadoras aprovechan la situación para obtener materias primas a muy bajo costos.
3. Grandes volúmenes de producción en países como Brasil y Vietnam con el ánimo de competir y acaparar mercados (producción intensiva en grandes extensiones y alta tecnificación).

Los sistemas tradicionales de producción de café en México, estructural y florísticamente ofertan gran número de servicios ambientales. Desde las últimas tres décadas, la captura de carbono es uno de estos servicios ambientales que ha tomado mayor relevancia a nivel global, dada la grave crisis ambiental



generada por el fenómeno de cambio climático. Autores como De Jong *et al.*, (1997a) y van Noordwijk *et al.*, (2002), resaltan el importante papel que pueden cumplir los sistemas de café bajo sombra y otros sistemas agroforestales y de manejo forestal en el proceso de captura de CO₂ y conformación de reservorios estables de carbono.



V. MATERIALES Y MÉTODOS

En el siguiente apartado se presenta la localización y características edafoclimáticas del área de estudio. También se detallan los materiales y métodos utilizados para la realización de la presente investigación.

5.1. El área de estudio

El área de estudio la comprenden mayoritariamente localidades del municipio de Huatusco. Además, se realizaron muestreos en el municipio de Chocaman y Totutla. Enseguida se presentan las características del municipio de Huatusco.

5.1.1. Localización

Los municipios del área de estudio (Figura 1) se encuentran ubicados en la Región de las Grandes Montañas, en la zona centro del Estado de Veracruz (INEGI, 2000).



Figura 1. Localización de la región cafetalera de Chocaman-Huatusco-Totutla, Veracruz, México.

El municipio de Huatusco está comunicado por la carretera principal Córdoba Xalapa, por donde se puede transitar, además, de estas ciudades, también hacia Coscomatepec, Fortín, Orizaba y México. Hacia el Puerto de Veracruz por las carreteras Huatusco-Conejos, Huatusco-Comapa-Soledad de Doblado y Huatusco- Col. Manuel González-Soledad de Doblado. Dentro del municipio se cuenta con una red carretera con un total de 100.60 km con caminos pavimentados y de terracería si bien que no están en excelentes condiciones, si se puede transitar (INEGI, 2000).



5.1.2. Extensión territorial

El municipio de Huatusco, tiene una superficie territorial de 212. 21 km². El municipio de Chocamán, 41.13 Km² y el municipio de Totutla, 80.61 Km² (INEGI, 2000).

5.1.3. Clima

De acuerdo con García (1988), el clima de Huatusco es de tipo (A) C(n) w^b(i)g, semicálido-húmedo con una temperatura media anual de y promedio de 18.8 °C; su precipitación pluvial media anual es de 1,763 mm.

5.1.4. Vegetación

Los ecosistemas que coexisten en el municipio es el bosque caducifolio (INEGI 2000).

5.1.5. Hidrografía

Se encuentra regado por una red de pequeños ríos tributarios del río Jamapa, que desemboca en el Golfo de México, formando la Barra de Boca del Río. Otro afluente que llega a formar el Río de los Pescados, es el que pasa entre las comunidades de Elotepec y la comunidad de Chichiquila, esta última perteneciente al Estado de Puebla (INEGI 2000).

5.1.6. Orografía

Por la situación geográfica donde está ubicado el municipio, en las estribaciones de la Sierra Madre Oriental, su topografía es accidentada observándose barrancas, lomas y lomeríos (INEGI, 2000).



5.2 Selección de parcelas

La investigación se llevó a cabo en sistemas agroforestales en base a café; la fase de campo, se realizó durante los meses de julio, agosto y octubre de 2008. De acuerdo a entrevistas con especialistas del Centro Regional Universitario Oriente (CRUO) y recorridos de campo, se seleccionaron las parcelas. Con el fin de minimizar el error muestral, se tomó en cuenta que los sitios contaran con homogeneidad en los siguientes indicadores: manejo del sistema, altitud, clima, suelo, forma del terreno y pendiente.

Los sistemas fueron clasificados por objetivos de producción, tipo de componentes presentes (árbol, arbustos y cultivo), arreglos espaciales y temporales, adaptabilidad ambiental y agroecológica y nivel de manejo socioeconómico (Nair, 1993).

5.3. Determinación de tratamientos

Para el presente estudio se considera a cada sistema agroforestal como tratamiento. Para ello, se consideraron los SAF's más frecuentes y relevantes (criterios culturales, económicos, étnicos, etc.). Según Callo-Concha (2001) es necesario realizar un muestreo piloto en sistemas parámetro: bosque primario y potrero (con varios años de aprovechamiento) que servirán de referente.

Parámetros:

1. Bosque primario. No intervenido, idealmente mantiene su flora intacta. Da idea de la cantidad de carbono almacenado en condiciones clímax.



2. Potrero. La última etapa de aprovechamiento en la secuencia RTQ (Roza-Tumba-Quema). Extremo inverso: deforestada, pisoteada, lixiviada.

Sistemas agroforestales:

- a) Agrisilvícolas: Café+Macadamia, Café+Plátano, Café+Cedro rosado, Café+Chalahuite.
- b) Silvopastoril: Ganado bovino+Huizache, Ganado bovino+Erythrina

En el Cuadro 3 se presentan los sistemas muestreados así como sus respectivas coordenadas de toma de datos del muestreo y su geoposición.

Cuadro 3. Localización geográfica de los sistemas agroforestales en base a café, silvopastoril y natural evaluados en Huatusco, Veracruz.

Sistema	Clave	Ubicación	Coordenadas	Altitud
Silvopastoril/Bovinos +Pasto+Huizache	SPh	Rancho Agroecológico "Las Cañadas", Huatusco.	19°10,49 N 96°57,85 W	1426 msnm
Silvopastoril/Bovinos+Pasto+Colorín	SPc	Rancho Agroecológico "Las Cañadas", Huatusco.	19°11,18 N 96°59,75 W	1458 msnm
Potrero Bovinos+Pasto estrella	Po	Centro Regional Universitario Oriente, Huatusco.	19°10,49 N 96°57,85 W	1297 msnm
Bosque primario	BPc	Rancho Agroecológico "Las Cañadas", Huatusco.	19°11,42 N 96°59,27 W	1375 msnm
Bosque primario	BPs	Centro Regional Universitario Oriente, Huatusco.	19°10,82 N 96°58,00 W	1325 msnm
Café+Chalahuite+Vainillo	CC	Camino a Chavaxtla	19°10,80 N 96°56,07 W	1270 msnm
Café+Macadamia	CM	Congregación Tlavipectan, Huatusco	19°10,80 N 96°56,09 W	1241 msnm
Café+Macadamia	CMk	Finca Kassandra, Totutla.	19°09,67 N 96°58,78 W	1243 msnm
Café+Cedro rosado	CCe	Finca Kassandra,	19°08,92 N	1191msnm



Sistema	Clave	Ubicación	Coordenadas	Altitud
		Totutla.	96°56,76 W	
Café+Cedro rosado	CCe		19°08,85 N 96°56,74 W	1179 msnm
Café+Plátano	CP	Chocaman	19°00,91 N 96°01,86 W	1360 msnm
Café+Plátano	CP	Chocaman	19°00,95 N 96°02,00 W	1355 msnm

De acuerdo con los 12 sitios seleccionados, en campo se evaluaron 24 parcelas con 4 repeticiones de 100 m² cada una. De las cuales fueron 18 de sistemas agrosilvopastoriles 4 para bosque y 2 para potrero.

5.3.1. Tamaño de muestra

El tamaño de los sitios de muestreo se representa en la Figura 2, donde, el rectángulo mayor (4 x 25 m) aplica al muestreo de especies arbóreas de tallos leñosos, el rectángulo mediano (1 x 1 m) aplica a las herbáceas, y en el cuadro menor (0.5 x 0.5 m) se muestrean la vegetación de hojarasca y mantillo de suelo.

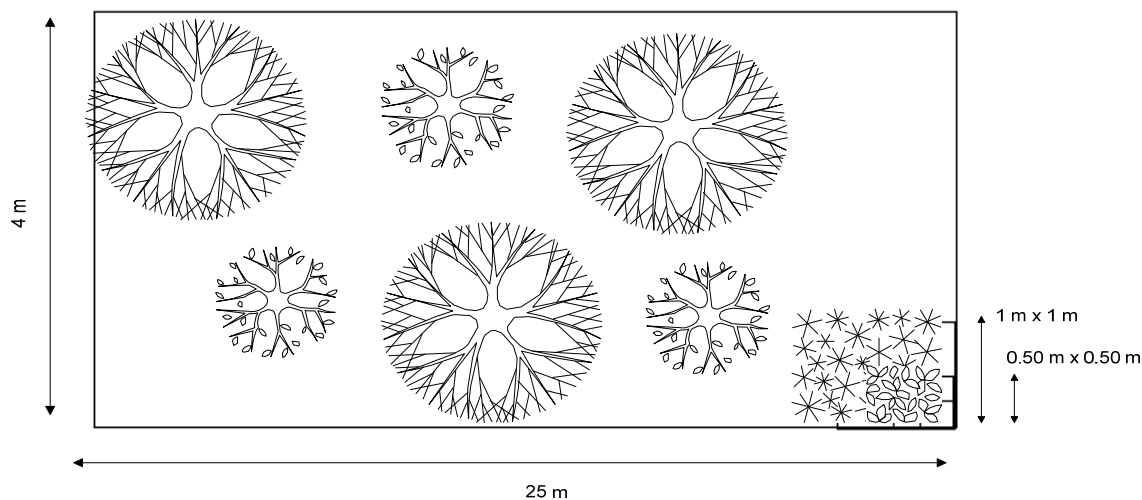


Figura 2. Tamaño de las parcelas de muestreo



5.4. Estimación de reservorios de Carbono

La cuantificación de los reservorios de carbono se realizó mediante el muestreo en parcelas rectangulares de 100 m². La metodología empleada para el establecimiento de tales parcelas fue ajustada según lineamientos técnicos descritos por diferentes autores para estudios ecológicos e inventarios de biomasa en bosques y sistemas agroforestales (Lamprecht, 1990; Woomer y Palm, 1993; MacDiken, 1997; CATIE, 2000; IPCC, 2003). En cada parcela se estimó la cantidad de carbono orgánico presente en los reservorios definidos por el IPCC (2003) para el desarrollo de proyectos forestales de mitigación de carbono que son:

- a. Biomasa vegetal viva: árboles, arbustos, hierbas, raíces (gruesas y finas).
- b. Materia orgánica muerta: ramas caídas y mantillo.
- c. Materia orgánica del suelo.

Se ubicaron parcelas de muestreo de 4 x 25 m al azar. En el cual se midieron todos los árboles de 2.5-30 cm de diámetro a la altura del pecho (DAP). En la misma área, al azar, se tiraron los cuadros de 1 x 1 m para muestreo de hierbas, 0.50 x 0.50 m para hojarasca y 0.25 x 0.25 m para suelo. En el punto central de cada rectángulo se determinó la posición geográfica de la parcela, con un sistema de posicionamiento satelital, GPS Garmin® modelo 12. En la Figura 3, se detallan las principales actividades desarrolladas en campo para la cuantificación de reservorios.

Las muestras de biomasa vegetal y hojarasca, fueron transportadas en bolsas plásticas. En laboratorio se obtuvo el peso húmedo de cada muestra y se registró en una libreta de campo de pasta dura.



Posteriormente las muestras se colocaron en bolsas de papel y se llevaron a la estufa para obtener peso seco. Una vez obtenido el peso fresco y peso seco de las muestras vegetales se realizaron los cálculos de acuerdo a las fórmulas.

Para suelo, las muestras fueron llevadas al Laboratorio Central Universitario de la UACH, para la estimación de C orgánico y densidad aparente.



Figura 3. Estimación de reservorios de carbono. a) Levantamiento de parcela para estimación de biomasa arbórea en un sistema silvopastoril b) Subparcela de 0.25 m^2 , y 0.0625 m^2 para cuantificación de biomasa herbácea y hojarasca.



c) Muestreo de hierbas d) Muestreo de suelo para cuantificación de materia orgánica.

5.5. Carbono en biomasa viva (BV)

La estimación del almacenamiento de carbono se realiza a partir de los inventarios de la biomasa del ecosistema, empleando la fracción de carbono, que representa el porcentaje de carbono en la biomasa. Las estimaciones del carbono almacenado en sistemas arbóreos asumen, en su mayoría, un valor de 0,5 (Brown y Lugo, 1984; IPCC, 1996).

5.5.1. Árboles (A) y arbustos (arb)

En las parcelas de 100 m², se midieron todos los diámetros de los árboles a la altura del pecho (Dap) entre 2.5 y 30 cm a una altura de 1.3 m² desde la base del suelo y la altura total de cada árbol. Para la medición de arbustos se utilizó un vernier y para arboles flexómetro.

Igualmente en parcelas de 100 m² se midió el café, el cual fue tomado como arbusto. La biomasa arbórea y arbustiva se calculó empleando los modelos alométricos desarrollados por diferentes autores, los cuales se relacionan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Modelos alométricos empleados en la estimación de biomasa arbórea y arbustiva, en sistemas agroforestales de café bajo sombra.

Especie	Ecuación Alométrica ¶	R ²	Fuente
Biomasa aérea	$Y = \exp[-2.977 + \ln(\rho D^2 H)]$	.99	Chave et al., 2005
Palmas	$Y = 10 + 6.4(H)$	.96	Frangi & Lugo 1985
<i>Musa sp</i>	$Y = 0.0303D^{2.1345}$	.99	Hairiah et al., 2001
<i>Coffea arabica</i>	$Y = 0.2811D^{2.0635}$	.94	Hairiah et al., 2001

¶ Y : Biomasa en kg (árbol)⁻¹ D : Diámetro normal en cm a 1.3 m. H : altura total en m. ρ : Densidad de la madera en g (mL)⁻¹. AB : Área basal en cm².



Para el caso de plátano, se emplearon modelos alométricos específicos. En general, estos modelos usan las siguientes variables: diámetro normal (DN), altura (h) y densidad de la madera (ρ); los datos de densidad se obtuvieron de Brown (1997) y Cordero y Boshier, 2003. Se asumió por convención, el valor de 0.5 como factor de carbono para el cálculo de densidad de carbono total presente en la biomasa arbórea y arbustos (IPCC, 2003).

En el siguiente cuadro se presentan las formulas utilizadas de acuerdo al tipo de clima. En el presente estudio, para las especies del bosque de niebla se utilizaron formulas generales (Brown, *et al.*, 1989). Debido a que no se tienen ecuaciones alométricas específicas.

Cuadro 5. Modelos alométricos para estimar la biomasa sobre el suelo del componente leñoso con datos de inventarios forestales.

Tipo de clima basado en precipitación anual	Ecuación	R^2 ajustado
Seco ($< 1500 \text{ mm año}^{-1}$)	$y = 34,4703 - 8,0671 D + 0,6589 D^2$	0,67
Húmedo ($150 - 4000 \text{ mm año}^{-1}$)	$y = 38,4908 - 11,7883 D + 1,1926 D^2$	0,78
	$y = \exp [-3,1141 + 0,9719 \ln(D^2H)]$	0,97
	$y = \exp [-2,4090 + 0,9522 \ln(D^2HS)]$	0,99
Lluvioso ($> 4000 \text{ mm año}^{-1}$)	$y = 13,2579 - 4,8945 D$	0,90
	$y = \exp [-3,3012 + 0,9439 \ln(D^2H)]$	0,90

Fuente: Brown *et al.* (1989).

y : biomasa sobre el suelo (kg MS árbol⁻¹); H: altura (m); D: diámetro a la altura del pecho (1,3 m) (cm); S : densidad de la madera (t m⁻³).

5.4.1.2. Hierbas (Hb)



Se eligió al azar dos cuadrantes de 1 x 1m, en cada una de las 4 subparcelas de 4 x 25 m. Se cortó toda la biomasa epigea de los arbustos con diámetro de copa menor a 2.5 cm y así mismo biomasa de la vegetación herbácea. La altura de corte fue a ras del suelo. Las muestras se trasladaron hasta el laboratorio en bolsas plásticas. Se obtuvo el peso fresco total y el peso fresco de una submuestra de aproximadamente 500 g la cual se introdujo a la estufa, en una bolsa de papel agujerada. Las muestras fueron secadas en estufa a 70 °C hasta peso constante, lo cual tardó 3 días. Para este estudio, las hierbas no se identificaron por género y especie.

5.4.2. Carbono en materia orgánica muerta (MOM)

5.4.2.1. Ramas caídas en el suelo (RCS)

Se calculó el volumen de ramas caída en el suelo a través del método de intersección planar, propuesto Van Wagner (1968), sobre estimaciones de volúmenes de ramas caídas en superficies forestales. Se muestrearon cuatro transectos de 25 m cada uno, teniendo como referencia la parcela de 1000 m² y en la cual se midieron ramas caídas con diámetros mayores a 3 cm según los siguientes estados de descomposición: fresco, seco y descompuesto; el volumen se calculó con la siguiente ecuación:

$$V = \frac{\pi^2 \sum d^2}{8l}$$

Donde,

V : volumen en m³

d : diámetro de la rama en m.

l : longitud horizontal del transecto de muestreo en m.



5.4.2.2. Hojarasca (H)

La hojarasca comprende todos los residuos orgánicos (hojas, ramas, frutos y semillas) de la superficie del suelo. La cuantificación de este componente es similar a la descrita en el caso del componente herbáceo, la cual es relativamente sencilla y consiste en el pesaje de todo el material vegetal encontrado y la toma de una muestra para transformar estos valores a materia seca. En este caso, no es necesario estimar la caída de hojarasca (MacDiken, 1997), ya que los inventarios de carbono miden el contenido de carbono en cada componente en un momento dado.

Dentro de los cuadrantes de 1 x 1 m, se tomaron subcuadrantes de 0.5 x 0.5 m. en ellos se peso la hojarasca acumulada para tomar después una submuestra de 500 g (peso fresco), se trasportó en bolsas plásticas. La submuestra se colocó en bolsa agujerada de papel y se metió a la estufa. La temperatura de la estufa fue a 70 °C y se alcanzó peso constante a los tres días de introducida la muestra.

5.4.3. Carbono de la materia orgánica del suelo (MOS)

El almacenamiento de carbono orgánico en los suelos depende de dos variables importantes: 1) la concentración de carbono orgánico en suelo y 2) la densidad aparente.

Los suelos agrícolas contienen carbono orgánico, pero no todos los suelos contienen carbono inorgánico (carbonatos). Comúnmente, se emplea el método de Walkley y Black (1938) para determinar el carbono orgánico del suelo. Aunque este método tiene algunas limitaciones, es altamente recomendado cuando no se requiere conocer el contenido total de carbono (MacDiken, 1997). Otros métodos estiman la concentración de carbono directamente, tales como los analizadores de C y N.



En los mismos sitios donde se recolectó el mantillo, se tomaron muestras de suelo con barrena tipo Hoffer y se conformaron muestras compuestas en los siguientes horizontes: 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm. Las muestras fueron enviadas al Laboratorio Central Universitario de la Universidad Autónoma Chapingo. El análisis de materia orgánica por el método de combustión húmeda descrita por Walkley & Black (1934). Además, en cada muestra se midió la densidad aparente, estas muestras fueron de 500 g para enviar a laboratorio y cuantificar el carbono orgánico total. La densidad aparente, entendida como la propiedad física de los suelos es el peso por unidad de suelo, y permite conocer el peso de cierto volumen de suelo para hacer las estimaciones del carbono orgánico por unidad de área. La determinación de la densidad aparente para estas muestras fue el método del terrón de suelo parafinado (Anderson y Ingram, 1993).

El contenido de carbono orgánico en suelos se calcula con base a las variables de C orgánico y densidad aparente, aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{COS} = \% \text{CO} \times \text{da} \times \text{Ps}$$

Donde:

COS: carbono orgánico de suelos (t ha^{-1})

%CO: concentración de carbono orgánico en suelos (%). En caso de tener valores de materia orgánica,

%CO = $0,58 \times \% \text{MO}$, según Walkley y Black (1938)

da: densidad aparente (g cm^{-3})

Ps: profundidad del suelo (cm)



Además, se aplicó 1.724 como factor de corrección del contenido de C en la materia orgánica (Fassbender, 1993).



VI. RESULTADOS

De acuerdo con los SAF`s más representativos de la región, se evaluaron tres sistemas de plantaciones comerciales: Café-Macadamia, Café-Cedro rosado y Café-Plátano; un sistema Silvopastoril: Bovinos+Pasto+Colorin y/o huizache; un sistema de plantación tradicional: Café+Chalahuite y dos sistemas como parámetro de referencia, el Bosque Caducifolio y el potrero.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la descripción de los sitios muestreados y la evaluación para los componentes aéreo (árboles, arbustos, herbáceas, mantillo y hojarasca) y subterránea (raíces y materia orgánica). La evaluación de secuestro de carbono en SAF`s en base a café y la simulación de escenario prospectivos para la fijación de carbono en los sistemas evaluados en el área de estudio.

6.1. Descripción de los sitios de muestreo

Los sistemas agroforestales, mantienen una estructura vertical y horizontal. Verticalmente se encuentran claramente definidos tres estratos: herbáceo, arbustivo = estrato arbóreo. El estrato arbustivo lo representa el cafeto y el arbóreo es ocupado por macadamia, cedro rosado, plátano y árboles del genero Inga (Chalahuite, Vainillo e Ixpepe), siendo el Chalahuite el más representativo. En el sistema silvopastoril de bovinos, se puede apreciar claramente el estrato herbáceo compuesto principalmente de pastos y el arbóreo ocupado por colorín o Huizache. Cada componente cumple su función en el sistema y coexisten armónicamente en el sistema durante su ciclo de producción. En el bosque caducifolio no es tan fácil observar un estrato herbáceo, pues al estar cerrado el dosel de los árboles la poca radiación solar que llega al nivel del suelo es insuficiente para las necesidades vitales de pastos y otras hierbas.



Escasamente se encuentran algunas plántulas emergentes, El estrato arbóreo se encuentra verticalmente muy bien definido.

Los tres sistemas agroforestales se basan en la producción de café, sin embargo, últimamente este se ha convertido en una actividad secundaria a la producción de “velillo” (hojas para tamales), macadamia o especies forestales para madera. En el sistema silvopastoril el principal producto es leche. Aunque no se ha tomado en cuenta la funcionalidad de los sistemas en el ambiente, cada uno genera productos intangibles y servicios ambientales.

Horizontalmente el cafeto se encuentra distribuido en marco real con distancias de: 2 x 2 m, a una densidad de plantación de 2,500 plantas⁻¹ ha⁻¹; 2.5 x 2.5 m (1,600 plantas⁻¹ ha⁻¹); marco rectangular de 2 x 3 m (1,650 plantas⁻¹ ha⁻¹); marco real de 3 m x 3 m (1089 plantas⁻¹ ha⁻¹). La densidad de árboles y cafetos depende del manejo, variedad, topografía del terreno y condiciones ambientales del sitio. La distribución espacial de los árboles en el bosque es mixta y la densidad es variable.

6.1.1. Silvopastoril

Huizache y Colorín. El sistema está compuesto en el estrato herbáceo por pasto estrella (*Cynodon plectostachyus* Pilger), pangola (*Digitaria decumbens* Stent.) y en mayor abundancia por Nandi (*Setaria sphacelata* (Schumach.) Stapf & C.E. Hubb. var. *anceps* (Stapf) Veldkamp). Los árboles de huizache (*Acacia pennatula*) están en hileras de 8 m entre planta y planta y 10 m entre hileras. En este se encontraban pastoreando vacas novillas raza Jersey, para producción de leche.



6.1.2. Bosque caducifolio

Chapingo / Cañadas. El bosque caducifolio de “Las Cañadas”, comprende una superficie de 100 hectáreas, en las cuales se puede encontrar, la vegetación original de este tipo de ecosistema. Es una comunidad clímax en la que se distinguen cuatro estratos de vegetación, alcanzando el superior 30 m de altura. La diversidad florística es de 44 familias botánicas, que incluye 64 géneros y 84 especies. Las especies arbóreas o arboriformes dominantes son: aguacatillo (*Phoebe mexicana* Meisn.), encino blanco (*Quercus xalapensis* Humb. & Bonpl.), guayabillo morado (*Zyzygium mexicana* Steud.), helecho arborescente (*Nephelea mexicana* (Schltdl. & Cham.) R.M. Tryon), ocozote (*Liquidambar styraciflua* L.) y quiavis (*Meliosma alba* (Schl.) Walp.) (Pérez y Robledo, 1996). El estrato inferior tiene escasa cobertura de herbáceas debido al sombreado, algunas especies frecuentes son: tepejilote cimarrón (*Chamaedorea oblongata* Mart.) y garrapatilla (*Selaginella galeotti* Spring). Desde el año 1980 el área se encuentra cercada y excluida de toda intervención humana. Se encuentra en un terreno de lomerío, ocupando una ladera convexa con pendiente máxima de 75%; el suelo es de tipo Andosol districo, con abundante acumulación de materia orgánica en la superficie (Cisneros *et al.*, 1993; Torres *et al.*, 2007).

Potrero. Es una comunidad vegetal dominada (90%) por pasto estrella de Africa (*Cynodon plectostachyus* Pilger), mezclada con gramas nativas (de los géneros *Axonopus*, *Panicum* y *Paspalum*), pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov.), trébol blanco (*Trifolium repens* L.) y otras herbáceas de hoja ancha. Incluye huizaches (*Acacia pennatula* Benth.) y cozotes (*Liquidambar styraciflua* L.) esparcidos, con densidad menor a 3 árboles ha⁻¹. Se encuentra ocupando lomeríos alargados de forma cóncavo-convexa, con pendiente máxima de 55%; y suelo tipo Alfisol vértico. Estos potreros se dedican desde hace más de 26 años al pastoreo con vacas de la raza Holstein, en un sistema de lechería semi-estabulada. La carga animal promedio ha fluctuado entre 1.75 a 2.15 cabezas ha⁻¹; con tiempo de



ocupación continuo en la estación seca del año y de 2 a 3 días en la estación lluviosa (Torres et al., 2007).

6.1.3. Café-Chalahuite

Generalmente no se cuenta con un marco de plantación en este tipo de sombra. El café al estar sembrado en laderas se distribuye en curvas a nivel. En este sitio se encontró el café a una distancia de 1.5 m x 1.5 m entre plantas y 2 m entre hileras.

Con el nombre común de vainillo o chalahuite se agrupan diversas especies de árboles de la familia de las Leguminosas (=Mimosoideae) que pertenecen al género *Inga* y que son ampliamente utilizadas como sombras en las regiones cafetaleras de México (Escamilla, 1997).

La presencia de *Inga spp* en los tres sistemas tiene como objetivo dinamizar la fijación biológica de nitrógeno atmosférico en el suelo a través de la asociación simbiótica de esta especie con bacterias del género *Rhizobium*. De acuerdo con Nair (1993) teniendo en cuenta el caso de *Inga vera*, esta especie puede alcanzar tasas de fijación de nitrógeno de 35 a 40 Kg de N₂ ha⁻¹ año⁻¹, que comparado con el nitrógeno de los fertilizantes representa una contribución importante de este elemento al suelo.

El género *Inga* con el 80 % de abundancia, se maneja con el objetivo de dinamizar procesos de fijación biológica de nitrógeno en el suelo, aporte de hojarasca y reciclaje de nutrientes, así como brindar sombra que propicie condiciones micro climáticas adecuadas para el desarrollo del cafetal.



6.1.4. Café- Macadamia

En este sistema, los árboles de macadamia (*Macadamia tetraphylla* L.A.S. Jhonson X *Macadamia integrifolia* Maiden and Betcher) tienen una edad de 10 años y se encuentran plantados a una distancia de 5 x 5 m entre plantas y 10 m entre hileras. Se encontraron combinados con café (*Coffea arabica*) en un marco de plantación de 1.5 x 1.5 m entre plantas y 2 m entre hileras.

La densidad de árboles para sombra es de 400 árboles⁻¹ha⁻¹ y este número puede aumentar o disminuir según el manejo.

6.1.5. Café- Cedro rosado

Los árboles de Cedro rosado (*Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn) tienen una edad de 8 años y se encuentran sembrados a una distancia de 5 m x 5 m entre plantas y 10 m entre hileras. El café (*Coffea arabica* L.) se encuentra a una distancia de 1 x 1 m entre planta y planta y 1.5 m entre hileras.

6.1.6. Café plátano

La finca tiene más de 30 años de establecida, la variedad de café (*Coffea arabica* L.) es criolla y se encuentra asociada con plátano morado (*Musa acuminata* Colla) destinado a la producción de hoja "velillo". Otras variedades de plátano son tabasco y dominico. De todas estas variedades en algunas épocas se deja la fruta para venta.

6.2. Caracterización de la actividad cafetalera



En los sistemas agroforestales, Café+Macadamia, Café+Cedro rosado, Café+Plátano y Café+Chalahuite, se realiza una poda sanitaria, tanto en los cafetos como en los árboles de sombra, una vez al año. Se lleva a cabo una vez que haya pasado la cosecha. En el cafeto es de gran importancia esta poda, asegurando una buena cosecha en el siguiente ciclo y en los árboles a fin de regular la sombra que proyectan; ambas son necesarias para asegurar una plantación libre de patógenos, hongos y bacterias principalmente. Para esta actividad se ocupa moruna (machete) y consiste en eliminar exceso de ramas, ramas desgajadas, secas o muertas.

El deshierbe es una práctica necesaria en el cafetal, se realiza año con año de 2-4 veces. El método empleado es combinado, de manera manual en época seca y de manera química en época de lluvias. La limpieza del cafetal es indispensable para mantener sana la plantación además de ser un aporte de materia orgánica al suelo al dejarse los restos vegetales en el cafetal.

Otra práctica importante en el manejo del cafetal es la fertilización. La cual se realiza una vez al año, utilizando productos como fosfonitrato, cloruro de potasio, triple 17, formula 18-12-06, formula 20-10-10 o urea, principalmente. La aplicación se hace en la etapa de pos floración (junio-septiembre) y la dosis varía de acuerdo a las posibilidades del productor. La dosis máxima en los últimos años ha sido de $500-600 \text{ Kg}^{-1}\text{ha}^{-1}$. Cabe mencionar que en el sistema Café-Chalahuite el abonado es omitido en la mayoría de los casos.

Es necesario recalcar que toda práctica realizada al cafetal implica un costo y tras los precios bajos del café, estas se han reducido al mínimo.

6.3. Secuestro de carbono en Sistemas Agroforestales

El este apartado se presenta los resultados obtenidos de la estimación de carbono secuestrado en los sistemas agroforestales así como en sus diferentes



componentes. Los valores de biomasa y carbono para cada especie evaluada, son reportados en kilogramos por tratamiento y por repetición. Los valores subtotales y totales se reportan en toneladas por hectárea. Los claves de identificación de tratamientos son los siguientes: Silvopastoril (Sp), Bosque primario (BoP), Café-Chalahuite (Ca+Ch), Café-Macadamia (Ca+Ma), Café-Cedro rosado (Ca+Ce), Café-Plátano (Ca+Pl) y Potreo (P).

6.2.1. Carbono arbóreo

En el bosque primario (BoP), se encontró la mayor cantidad de carbono con (265.79 t C ha⁻¹) y en el tratamiento Potrero (P) al no tener presencia de especies arbóreas no registra datos para este tratamiento. El sistema agroforestal que presentó la mayor cantidad de carbono aéreo, es el tratamiento Café+Cedro rosado (Ca+Ce) con 113.95 t C ha⁻¹. Seguidos de este, se presentan de mayor a menor los siguientes sistemas: Café-Macadamia (Ca+Ma) con 33.91 t C ha⁻¹, Café-Chalahuite (Ca+Ch) con 28.77 t C ha⁻¹, Café-Plátano (Ca+Pl) con 26.90 t C/ha⁻¹ y por último al sistema Silvopastoril (Sp) con 1.46 t C ha⁻¹ (Cuadro 6)

Cuadro 6. Cantidad de carbono secuestrado (t C ha⁻¹) en árboles vivos y muertos según sistema agroforestal de uso del suelo en Huatusco, Veracruz.

Nomenclatura	Sistema de uso	Carbono Secuestrado
Sp	Silvopastoril	1.46
BoP	Bosque caducifolio	265.79
Ca+Ch	Café+Chalahuite	28.77
Ca+Ma	Café+Macadamia	33.91
Ca+Ce	Café+Cedro Rosado	113.95
Ca+Pl	Café+Plátano	26.90
P	Potrero	0.0



Para la evaluación de los sistemas agroforestales en base a café, se buscó la similitud de condiciones edafoclimáticas y de altitud, sin embargo, se presentan variaciones muy marcadas de C arbóreo. Esto se debe principalmente a la heterogeneidad de las plantaciones, las densidades de plantación, el manejo técnico-agrícola pero sobre todo a la edad. El tratamiento Sp está sometido al constante ramoneo de los bovinos y al número mínimo de árboles para permitir el crecimiento de los pastos, es lógico que presente menor cantidad de C. En el tratamiento Ca+PI se debe tomar en cuenta que el producto obtenido de este sistema es la hoja de plátano (velillo) por lo cual está sometido a la constante poda y manejo intensivo de la plantación. En cuanto a Ca+Ch y Ca+Ma se tiene que son sistemas especializados, el primero es un sistema tradicional cuyo principal producto es el café, las podas de Chalahuite se hacen necesarias en este sistema y no se permite el crecimiento excesivo de los árboles; en el segundo se obtiene como producto café y macadamia, la macadamia se encontró desde los 5 a 20 años edad. Así mismo el tratamiento Ca+Ce, el cual presenta la mayor cantidad de C de los sistemas sometidos a manejo agropecuario, se tiene que los cedros presentan un rápido crecimiento, superior a las demás especies que se encuentran en asociación con café.

Otro factor importante a considerar a nivel individual de las especies y que afectan las estimaciones de e biomasa en el componente arbóreo es el patrón de crecimiento, la dinámica de regeneración y la emergencia múltiple.

En el café los patrones de crecimiento dependen de la variedad utilizada. Es frecuente encontrar 3-9 ramificaciones, por debajo al DAP, ante la presencia de este factor en ramificaciones secundarias y terciarias la divergencia de salidas entre los modelos utilizados crece más.

Como lo señala Rajagolpa (2004) la dinámica de regeneración puede afectar también los stocks de CO₂ como es el caso del plátano y su hábito para regenerar hijuelos, que sumados a su capacidad de crecimiento puede afectar



fuertemente los volúmenes de biomasa. La emergencia múltiple, en el caso del café se presenta cuando dos o más individuos emergen en un mismo nicho.

6.4. Carbono herbáceo

El mayor contenido de carbono herbáceo se encontró en el tratamiento P, esto se debe principalmente a la presencia de pastos, expuestos a la luz solar. Seguidos de este, se tiene a los tratamientos Bop y Sp que presentan valores de 0,64 y 0,61 t C ha⁻¹ respectivamente. Cabe mencionar que si bien el bosque tiene alta densidad de árboles, se puede encontrar algunas hierbas, producto de claros abiertos por la caída de árboles y ramas y al ser bosque caducifolio, las condiciones de temperatura, humedad y luz permiten el rápido crecimiento de semillas latentes en el suelo. Como se muestra en el Cuadro 6, se presentan valores de cero t C ha⁻¹ para los tratamientos Ca+Ch, Ca+Ma y Ca+Pl, debido a que el componente arbóreo y arbustivo impiden el crecimiento de hierbas y a la cantidad de hojarasca producida por los mismos.

Cuadro 7. Cantidad de carbono secuestrado (t C ha⁻¹) en arbustos y hierbas según sistema agroforestal de uso del suelo en Huatusco, Veracruz.

Nomenclatura	Sistema de uso suelo	Carbono Secuestrado(t C ha ⁻¹)
Sp	Silvopastoril	0.61
BoP	Bosque caducifolio	0.64
Ca+Ch	Café + Chalahuite	0.0
Ca+Ma	Café + Macadamia	0.0
Ca+Ce	Café + Cedro rosado	0.13
Cs+Pl	Café + Plátano	0.0
P	Potrero	1.78

6.5. Carbono en hojarasca

El tratamiento BoP presenta el mayor valor calculado para esta variable, con una cantidad de 1.93 t C/ha⁻¹, seguido muy cerca por el tratamiento Ca+Ch con



1.87 t C/ha⁻¹. En chalahuite es una especie muy utilizada en los SAF's tradicionales debido a la incorporación de materia orgánica, tal característica se resalta en lo obtenido en esta evaluación, al colocarse en segundo lugar después del Bosque. En el mismo orden de mayor a menor se puede observar en el cuadro 7 los siguientes tratamientos: Sp (1,22 t C ha⁻¹), Ca+PI (1,01 t C ha⁻¹) Ca+Ma (0,85 t C/ha⁻¹), Ca+Ce (0,63 t C ha⁻¹) y P (0 t C ha⁻¹).

Cuadro 8. Cantidad de carbono secuestrado (t C ha⁻¹) en hojarasca según sistema agroforestal de uso del suelo en Huatusco, Veracruz.

Nomenclatura	Sistema de uso de suelo	Carbono Secuestrado
Sp	Silvopastoril	1.22
BoP	Bosque caducifolio	1.93
Ca+Ch	Café + Chalahuite	1.87
Ca+Ma	Café + Macadamia	0.85
Ca+Ce	Café + Cedro rosado	0.63
Cs+PI	Café + Plátano	1.01
P	Potrero	0.00

Cabe mencionar que en el tratamiento Sp, las vacas pastoreadas son rotadas en las subdivisiones del potrero, permitiendo que los restos de pasto se incorporen como mantillo. El tratamiento P presenta valor a cero, debido al manejo intensivo, por lo tanto la formación de mantillo es baja o se incorporada rápidamente al suelo mediante el pisoteo.

6.6. Carbono total de la biomasa aérea

El mayor valor obtenido del carbono Total de la Biomasa Aérea es el del tratamiento BoP (268.36 t C ha⁻¹), punto de comparación, lo cual es lógico por ser un bosque primario conservado. En los SAF's evaluados (Cuadro 9) el tratamiento Ca+Ce con 114.71 t C ha⁻¹ representa el sistema con mayor valor



de C acumulado. La correlación entre el carbono arbóreo y el total es reiterado en este apartado, ya que siguen el mismo patrón de acumulación y distribución.

Cuadro 9. Cantidad total de carbono secuestrado ($t\ C\ ha^{-1}$) en árboles, arbustos y hierbas según sistema agroforestal de uso del suelo en Huatusco, Veracruz.

Nomenclatura	Sistema de uso de suelo	Carbono Secuestrado
Sp	Silvopastoril	3.29
BoP	Bosque caducifolio	268.36
Ca+Ch	Café + Chalahuite	30.64
Ca+Ma	Café + Macadamia	34.76
Ca+Ce	Café + Cedro rosado	114.71
Cs+Pl	Café + Plátano	27.91
P	Potrero	1.78

6.7. Fijación de carbono subterráneo por sistema de uso de suelo

De acuerdo a los cálculos realizados se encontró que el tratamiento Ca+Ce es el que presenta mayor contenido de carbono en el suelo con $106.74\ t\ C\ ha^{-1}$, y el menor por el tratamiento P con $48.16\ t\ C\ ha^{-1}$. Cabe mencionar que el bosque primario representa el sistema que más almacena carbono con un total de 201.41 representando el 43 % del total que tiene el sistema.

Cuadro 10. Carbono Base Subterráneo para diferentes sistemas de cobertura en Huatusco, Veracruz.

Sistema (Tratamientos)	Asociación	C.B.A.	Prof. Suelo	D.A.P.	M.O.	C.B.S. $t\ ha^{-1}$
Sp	Silvopastoril	3.29	0.30	0.91	3.90	59.717
BoP	Bosque caducifolio	268.79	0.30	0.74	6.70	201.413
Ca+Ch	Café+Chalahuite	30.64	0.25	1.12	3.35	65.378
Ca+ Ma	Café + Macadamia	34.76	0.25	0.83	4.14	62.833
Ca+Ce	Café+Cedro rosado	113.95	0.30	0.88	3.82	106.744
Ca+Pl	Café+Plátano	27.91	0.30	0.90	4.68	82.058
P	Potrero	1.78	0.30	0.92	3.12	48.163

Nota: C.B.A. Carbono-Base aéreo, D.A.P.: Densidad aparente del suelo, M.O.: % de Materia Orgánica del suelo y C.B.S.: Carbono Base Subterráneo



6.8. Carbono base total por sistema evaluado

El sistema de Bosque Primario, es el que más carbono tiene secuestrado, más del doble que el sistema café+macadamia, resaltando la importancia y del papel que juegan los bosques de neblina.

Cuadro 11. Cálculo de Carbono Base total para diferentes sistemas de cobertura en Huatusco, Veracruz.

Sistema	Asociación	CO ₂ aéreo	CO ₂ Subt.	CO ₂ Base-Total
Sp	Silvopastoril	3.290	52.250	55.540
BoP	Bosque caducifolio	268.790	201.410	467.200
Ca+Ch	Café+Chalahuite	30.640	65.370	96.010
Ca+ Ma	Café + Macadamia	34.760	62.830	97.590
Ca+Ce	Café+Cedro rosado	113.950	106.740	220.690
Ca+PI	Café+Plátano	27.910	82.050	109.960
P	Potrero	1.780	48.160	49.940

En cuanto al Carbono Base Total de los sistemas evaluados se encontró que el Tratamiento Ca+Ce presenta el mayor valor con 220.690 t C ha⁻¹, mientras que el tratamiento presenta el menor es el P con 49.940 t C ha⁻¹ (Figura 10)

6.9. Escenarios sugeridos de fijación de carbono

Lo escenarios sugeridos de fijación de carbono se refieren a la ganancia de CO₂ en forma de biomasa aérea y subterránea de un sistema agroforestal comparado con un monocultivo. En el Cuadro 11 se muestran los resultados obtenidos de dicha comparación. El tratamiento Ca+Ce muestra una ganancia de 194.169 t C ha⁻¹ el cual supera a los demás tratamientos, nótese que el tratamiento Ca+Ch es el que presenta el menor valor de ganancia con 69.489 t C ha⁻¹.



Cuadro 11. Ganancia de CO₂ de los sistemas agroforestales en Huatusco, Veracruz.

Sistema (Tratamientos)	Asociación	CO ₂ monocultivo	CO ₂ agroforestal	Ganancia CO ₂
Sp	Silvopastoril	55.540	55.540	0.000
BoP	Bosque caducifolio	467.200	467.200	0.000
Ca+Ch	Café+Chalahuite	26.521	96.010	69.489
Ca+ Ma	Café + Macadamia	26.521	97.590	71.069
Ca+Ce	Café+Cedro rosado	26.521	220.690	194.169
Ca+PI	Café+Plátano	26.521	109.960	83.439
P	Potrero	49.940	49.940	0.000

Como se puede observar en la Figura la ganancia de C en los sistemas agroforestales es evidente. Al combinar dos o más especies un mismo sistema, las especies arbóreas contribuyen a que haya mayor cantidad de C, lo cual se ve reflejado en esta evaluación.



VII. DISCUSIÓN

Los sistemas anteriormente evaluados en la región de Huatusco son de gran importancia comercial representando los ingresos de los productores, la diversidad, arreglo y manejo diferencian la cantidad de carbono secuestrado en el sistema.

Las densidades de carbono total para el bosque primario son similares a las reportadas por Callo (2001) en sistemas naturales de la selva peruana. El % de carbono arbóreo es similar al reportado por Nedler *et al.* (2001) de un sistema natural de bosque.

Para el caso de los sistemas agroforestales en base a café y aunque pueden existir diferencias en cuanto a especies y arreglos topológicos los resultados observados fueron menores a los reportados por Rajagolpa (2004) cítrico-café-plátano, esto puede deberse a que cuenta con el componente cítrico que son arboles que incrementan el almacenamiento aéreo. Aguirre (2006) reporta para el caso de café natural en el estado de Chiapas $129.82 \text{ T C ha}^{-1}$, muy parecidos a lo encontrado en el sistema de café + chalahuite. Para el caso de café con distintos tipos de vegetación las densidades de C por sistema en la biomasa viva y la materia orgánica del suelo, son similares a las reportadas por Callo (2001) $29\text{-}215 \text{ T C ha}^{-1}$ en sistemas en base a café y Rajagolpa (2004) con $186.48 \text{ T C ha}^{-1}$, para cítrico con café en, Perú y México respectivamente. En el caso de la Biomasa viva (BV) reportado para sistema de cítricos con café y cítricos con café y plátano en el trópico húmedo mexicano almacenaron 56.59 y $61.65 \text{ t C ha}^{-1}$, mientras la materia orgánica del suelo (MOS) almacenó 128 y $132.39 \text{ t C ha}^{-1}$ Rajagolpa (2004).

En la Amazonia Peruana un sistema de café bajo sombra de *Inga spp*, Callo, (2001) reporta que se almacenó 46.15 y 95.97 t ha^{-1} en la BV y la MOS.



Schroth, G., y Sinclair, F. L. (2003) reporta que el aporte de C que realiza el mantillo es de 6 t ha^{-1} aproximadamente, en el reservorio de materia orgánica muerta en CN, CMBS y CPT, como resultado de la acumulación de materiales de hojarasca y tallos en diferentes estados de descomposición (Fassbender, 1991; Schroth y Sinclair, F. L. (2003). A su vez el mantillo es uno de los compartimientos más constantes en cantidad de C almacenado en los sistemas evaluados.

El almacenamiento de Ct es de 124 t ha^{-1} para un periodo de acreditación de 20 años. La captura neta de C desarrollando un proyecto de mitigación es de $30.54 \text{ t C ha}^{-1}$. Teniendo en cuenta la estructuración vertical y horizontal de los sistemas, la captura de C a través de un proyecto de mitigación se facilitaría en los sistemas CN y CMBS considerando la densidad de árboles presente y la preeminencia de *Inga spp* como columna vertebral de la sombra. La renovación parcial del sombrío con especies maderables y el establecimiento de árboles en áreas con bajas densidades son acciones a realizar para este fin; sin embargo, el desarrollo y supervivencia del nuevo componente forestal estaría condicionado por las características de la especie, calidad del sitio, nivel de competencia entre cohortes y el manejo y cuidado de la plantación (De Jong, 2000).

Teniendo en cuenta el contenido de Ct en los sistemas CN, CMBS, CPT de 129.82, 170.46, 215.64 y t ha^{-1} respectivamente, es de suma importancia la conservación de estos a través del tiempo. La conversión a otros sistemas de producción como la ganadería, traería serias consecuencias ambientales como la emisión de grandes volúmenes CO_2 a la atmósfera. De acuerdo con Moguel y Toledo (1999), el 60 % de las áreas cafetaleras se encuentran bajo manejo tradicional (420.000 ha); si durante las próximas décadas existieran políticas o crisis económicas que condujeran a la eliminación del 20 % del área cultivada, las emisiones de C a la atmósfera producto solamente de la quema de los reservorios de biomasa viva (BV) y materia orgánica muerta (MOM) alcanzarían



el orden de 4.436.880 Mg C, sin incluir los fuertes impactos sobre el suelo, la biodiversidad, regulación hidrológica entre otros.

La difícil situación económica por la que atraviesa el sector cafetalero, hace indispensable implementar nuevas acciones que promuevan el desarrollo sostenible y a su vez mejoren los ingresos de los productores. La evaluación económica de los tres escenarios 1) café natural, 2) café natural, captura de carbono y venta de madera y 3) manejo orgánico, captura de carbono y venta de madera, indican que a medida que se integra una nueva estrategia de manejo, los costos y los beneficios incrementan. Comparando el escenario 1 y 2 la relación B/C aumenta 1.2 puntos; cuando se integra el manejo orgánico y la captura de carbono (escenario 3), la relación aumenta 1.1 punto.

Analizando el gran número de actividades necesarias para la producción de café orgánico sin incluir beneficios que se obtienen por la venta de madera y créditos de carbono, la relación B/C es muy baja (1.2), esto quiere decir que los esfuerzos que realizan el productor para generar mayor valor agregado en el precio del café y a su vez promover la conservación y manejo de los recursos naturales no es todavía justamente recompensada.

Al integrar solamente el pago por captura de carbono la relación B/C es igual a 3.7. Aunque este indicador es relativamente alto, el aporte económico de la captura de carbono respecto a otros productos es reducido, \$ 6.783 frente a \$ 208.601 por venta de café y \$ 168.972 por venta de madera. El mayor aporte económico en los escenarios 2 y 3, lo genera la venta de la madera a los 20 años; sin embargo el aprovechamiento de este producto es a largo plazo y no garantiza un flujo constante de ingresos a través del tiempo (beneficios muy puntuales en el tiempo).

El costo de la captura de C en cafetales bajo sombra, considerando únicamente el manejo de la biomasa viva es muy bajo, US \$ 6.3 Mg C. Aunque los beneficios económicos se transfieren más hacia la venta de la madera, los costos de establecimiento y manejo permitirían de cierta forma una fácil



implementación. Como se menciono anteriormente, la renovación de la sombra y el aumento de la densidad de árboles, incrementaría el C que puede ser capturado y por ende los beneficios económicos generados por el pago del servicio ambiental; sin embargo es importante diseñar el sistema de tal manera que mantenga un nivel de sombra adecuado en el cafetal entre el 35 y el 45 % con el fin de sostener niveles adecuados de producción (Soto – Pinto *et al*, 2000).

La TIR al igual que el VPN y la relación B/C es mayor en los escenarios 2 y 3 respecto al escenario 1 y el margen de maniobra de un proyecto aumenta en la medida que existe un nuevo componente de manejo. Considerando la TIR en los escenario 2 y 3, el proyecto respectivo soportaría tasas de interés inferiores al 15.2 y 19,4 % respectivamente. Tasas por encima de este valor harían inviable el proyecto de captura de carbono, venta de productos maderables y manejo orgánico de café. Es importante resaltar el incremento que se da en la TIR cuando se pasa del escenario 2 al 3. De cierta forma la transformación de un sistema de café natural a café orgánico integrando la captura de carbono, traería mayor estabilidad al proyecto y mejoraría el nivel de ingresos promedio que percibe el productor.

Cuando los costos de producción aumentan y los beneficios percibidos por la venta de café, créditos de carbono y madera se reducen un 20 %, el VPN y B/C disminuyen. Sin embargo la rentabilidad del sistema se mantiene por los ingresos que se perciben de la venta de madera principalmente. En la medida que la tasa de descuento aumenta la rentabilidad del proyecto en términos de VPN y B/C se reduce proporcionalmente.

Los beneficios económicos por la captura de C en los sistemas de café bajo sombra son mínimos, apenas representan el 2 % de los ingresos de los productores. Aunque los costos de implementación son bajos, el pago por el servicio no es lo suficientemente atractivo para el productor; por tal motivo la viabilidad del mismo estaría muy ligada a la presencia de estímulos o subsidios



en las etapas de establecimiento y manejo de las plantaciones forestales por parte de la instancia promotora del proyecto.

Otro aspecto fundamental es la diversificación de los sistemas productivos, no solamente con especies maderables sino con árboles frutales y especies agrícolas que puedan generar productos en el corto y mediano plazo. Para tal fin es indispensable desarrollar curvas de crecimiento para árboles frutales, y de esta manera certificar la acumulación de C a través del tiempo. Complementariamente las agencias ejecutoras deben integrar claramente el concepto de diversificación y en lo posible dediquen los recursos que se obtienen por concepto del pago del servicio ambiental, a la promoción de nuevos proyectos productivos que involucre el concepto de desarrollo sostenible y generen mayor impacto en la economía del productor.



VIII. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados y al análisis en la presente investigación se concluye lo siguiente:

Los sistemas agroforestales en base a café capturan en promedio 131 t C ha^{-1} ser sistemas perennes y con un manejo adecuado, donde los residuos se incorporen a al suelo como materia orgánica, se puede asegurara que esta cantidad de carbono secuestrado se puede mantener. Los cafeticultores pueden incursionar en el mercado de Pago por Servicios Ambientales y obtener ingresos por ello.

De acuerdo a los resultados en base aérea de los sistemas en base a café encontramos al sistema café+cedro rosado, café+macadamia, café+chalahuite y café+platano. Almacenando 114.71 , 34.76 , 30.64 y $27.91 \text{ t C ha}^{-1}$ en ese orden donde los sistemas maduros (mayor edad) muestran un incremento en el almacenamiento de carbono, comparado con los sistema más jóvenes.

Para el caso del bosque primario encontramos el carbono en base aérea es de $268.36 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Lo que representa más del doble de lo que presentó el sistema de cedro rosado, pero a diferencia, en el bosque la tasa de secuestro es mayor debido a que el bosque mantiene en base aérea la mayor cantidad posible de carbono almacenado.

Para el caso de los sistemas silvopastoril y potrero se encontró en base aérea 3.29 y $1.78 \text{ Mg C ha}^{-1}$. En ese orden un bajo almacenamiento de carbono en comparación con los sistemas sin el componente animal.

En el caso del carbono almacenado en la materia orgánica muerta almacenó similar cantidad de C comparada con la base aérea respectivamente en los sistemas agroforestales en base a café.



IX. BIBLIOGRAFIA

- Aguirre Dávila C. M. servicios ambientales: captura de carbono en sistemas de café bajo sombra en Chiapas, México. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. México 85p.
- Anderson, J.; M., Ingram, J. S. I. 1993. Tropical soil biology and fertility a handbook of methods. Second edition. CAB International. London UK. p. 95-97.
- Ávila, V. G. 2000. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol. Tesis MAg. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 102p.
- Ávila, G., Jiménez, F., Beer, J. Gómez, M., e Ibrahim, M. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. Agroforestería de las Américas 8 (30): 32 – 35.
- Brown, S.; Lugo, A. E. 1984. Biomass of tropical forests: A new estimate based on forest volumes. Science 223: 1290-1293.
- Brown, S. 1997. Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: a Primer. (FAO Forestry Paper - 134). Rome, 1997. 89 p.
- Barbaran G., J. 1998. Determinación de biomasa y carbono en los principales sistemas de uso del suelo en la zona de campo verde. Tesis profesional. Facultad de ciencias agropecuarias. Universidad nacional de Ucayali. Pucallpa, Ucayali, Perú. 54 p.
- Callo-Concha D. A. 2001. Cuantificación del carbono secuestrado por algunos sistemas agroforestales y testigos en tres pisos Ecológicos de la Amazonia del Perú. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. México 72p.



- Cairns, M. A. Haggerty P. K., Alvarez, R., Ben H. J. De Jong, Olmsted, I. 2000. Tropical Mexico's recent land use change: A region's contributions to the global carbon cycle. *Ecological Applications* 10 (5) 1426 – 1441.
- Castellanos, J., J. 1991. Root biomass of a dry deciduous tropical forest in Mexico. *Plant and Soil*. 131:225-228.
- Castañeda, M., A, Vargas, H., J, Gómez, G., A, Valdez, H, Vaquera, H., H, Acumulación de Carbono en la Biomasa Aérea de una Plantación de *Bambusa oldhamii*. *Revista Agrociencia*. Enero-Febrero. 2005. Vol. 39. Número 1. Pág. 107-116.
- CATIE. 1997. Resultado de 10 años de investigación silvicultural del proyecto Maledeña en Nicaragua. Serie Técnica. Informe Técnico No 292. Turrialba, Costa Rica. 145 p.
- CATIE. 2000. Parcelas permanentes de muestreo en bosque natural tropical, guía para el establecimiento y medición. Turrialba, Costa Rica. 52p.
- Chavez, J., Andalo, C., Brown S., Cairns, M. A., Chambers, . Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira T., Lescure, J. – P., Nelson, B. and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecología* 145 p.
- Cisneros, V., D. Martínez, S. Díaz, J. A. Torres, C. Guadarrama y A. Cruz. 1993. Caracterización de la agricultura de la zona central de Veracruz. Centro Regional Universitario Oriente, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 339 p.
- Cordero, J., y Boshier, D. H. 2003. Árboles de Centroamérica: Un manual para extensionistas. Oxford Forestry Institute "OFI" y Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza "CATIE". 1077 p.
- De Jong, B., Masera, O. y Hernández-Tejeda T. 2004. Opciones de captura de carbono en el sector forestal. In, *Cambio Climático: Una visión desde México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) e Instituto Nacional de Ecología (INE). 1ra Ed. México. 369–380.



- De Jong, B., Soto, L., Montoya, G., Nelson, K., Taylor, J., y Tipper, R. 1997a. Forestry and agroforestry alternatives for carbon mitigation: an analysis from Chiapas, Mexico. In: Adger W., Pettenella D., Whitby M.C., (eds). Climate Change Mitigation and European Land Use Policies. CAB International, Wallingford, UK. P. 263-284.
- De Jong, B., Tipper, R., Taylor R. 1997b. A Framework for monitoring and evaluation of carbon mitigation by farm forestry projects: example of a demonstration project in Chiapas, Mexico. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, Vol 2 (1997): 231 - 246
- Diario el Milenio. 2001. Crece la amenaza por el cambio climático. Milenio Diario, lunes 19 de febrero, 2001. p 35.
- Dixon, R. K. 1995. Agroforestry systems: sources or sinks of greenhouse gases? Agroforestry Systems 31: 99–116.
- Dixon, R.K., S. Brown, R.A. Houghton, A.M. Solomon, M.C. Trexler y J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. Science 263: 185-190.
- Fassbender, H. W. 1993. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza, CATIE. 2^{da} Ed. Turrialba, Costa Rica. 491 p.
- García, M. E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 4 edic. México, D.F.
- Garduño, R. 2004. Que es el efecto de invernadero. In, Cambio Climático: Una visión desde México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) e Instituto Nacional de Ecología (INE). 1ra Ed. Mexico. 29 – 39.
- Gay, C. 2000. El Cambio climático, el problema global más importante del futuro. Gaceta UNAM, Noviembre 13. No. 3411: 12-13.
- Goudie, A., 1990. *The Human Impact on the Natural Environment*. Basil Blackwell Ltd, Oxford, U.K. 3th Edition. 388 pp.
- Gresser, Charis y Tickell, Sophia. 2002. Pobreza en tu taza de café. Oxfam Internacional. Perú. 54 p.



- Grupo intergubernamental de expertos sobre cambio climático "IPCC". 1996. Tecnología, políticas y medidas para mitigar el cambio climático (en línea). OMM y PNUMA. 102 p Disponible en <http://www.ipcc.ch>.
- Guízar N., E. y Cedillo P., E. (1996). Botánica económica del trópico seco mexicano. Revista Chapingo, 2(1), 61-72 (Serie de Ciencias Forestales).
- Hairiah, K., Sitompul, S.M., van Noordwijk, M. and Palm, C.A. 2001. Carbon stocks of tropical land use systems as part of the global carbon balance: effects of forest conversion and options for clean development activities. Alternatives to slash-and-burn (ASB) Lecture Note 4. ICRAF, Bogor, Indonesia.
- Hamburg, Steven P. 2000. Simple rules for measuring changes in ecosystem carbon in forestry-offset projects. *Mitigation and adaption strategies for global change*, 5, 25–37.
- Herrera y Orrego (2001), Biomasa de la vegetación herbácea y leñosa pequeña y necromasa en bosques tropicales primarios y secundarios de Colombia. Universidad nacional de Colombia. http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio_carbono/28_Herrera.PDF 27/09/2009 12:15 Pm.
- Houghton, R.A. y C.M. Woodwell. 1989. Global climate change. *Scientific American* 260(4):36-40.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1992. Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press. Cambridge, Inglaterra.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e INFORMATICA). 2000. Anuario estadístico del estado de Veracruz. Talleres de impresión del INEGI, Aguascalientes.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climatic Change). 1995. Climate Change 1995. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jaramillo, V. J. 2004. El ciclo global del carbono. Una visión desde México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales



(SEMARNAT) e Instituto Nacional de Ecología (INE). 1^{ra} Ed. México. 76-85.

- Krishnamurthy, L. R., y Ávila M. 1999. Agroforestería básica. Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. México D.F., México. 340 p
- Kursten, E. y Burschel p. 1993. Co₂-mitigation by agroforestry. *Water, Air and Soil Pollution* 70:533-534.
- Lamprecht, Hans. 1990. Silvicultura en los Trópicos. Los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas, posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido. Cooperación Técnica, República Federal de Alemania. Eschborn. 335p.
- Lashof, D.A. y D.R. Ahuja. 1990. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. *Nature* 344(5): 529-531.
- López M. A. 1998. Aporte de los sistemas silvopastoriles al secuestro de carbono en el suelo. Tesis de maestría. Escuela de postgrado, programa de enseñanza para el desarrollo y la conservación, CATIE. Turrialba, costa Rica. pp: 3-15.
- MacDiken, K. 1997. A Guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Arlington, VA, US, Winrock International. 87 p.
- Masera, O., 1995. Carbon Mitigation Scenarios for Mexican Forests: Methodological Considerations and Results. *Interciencia*, 20:6, 388-395.
- Melillo, J. M., P.A. Steudler, J.D. Aber y R.D. 1989. In: M.O. Andreae y D.S. Schimel (Eds.) Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. Wiley & Sons, p. 263-280.
- Melo Cruz, O. A. y Vargas, Ríos R. 2003. Evaluación ecológica y silvicultural de ecosistemas boscosos. Universidad del Tolima, CRQ, CARDER, CORPOCALDAS, CORTOLIMA. 235 p.
- Mintzer, I.M., 1992. Confronting Climate Change. Risk Implications and Responses. Cambridge, University Press, Cambridge.
- Moguel, Patricia y Toledo Víctor M. 1996. El Café en México, ecología, cultura indígena y sustentabilidad. *Ciencias* 43: 40 – 51.



- Moguel, Patricia y Toledo Víctor M. 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology* 13 (1): 11 – 21.
- Mohren, G.M.J. y C.G.M. Klein Goldewijk, 1990. CO2 Fix: A Dynamic Model of The CO2 Fixation in Forest Stands. Rapport NR. 624, Research Institute For Forestry and Urban Ecology, Wageningen.
- Montoya, G., Soto, L., Ben de Jong, K. Nelson, P. Farías, Pajal Y., T, J. Taylor y R. Tipper. 1995. Desarrollo Forestal Sustentable: Captura de Carbono en las Zonas Tzeltal y Tojolabal del Estado de Chiapas. Instituto Nacional de Ecología, Cuadernos de Trabajo 4. México, D.F.
- Montagnini, F., y Nair, P. K. R. 2004. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. In *Agroforestry Systems*. 61: 281 – 295.
- Nair, P. K. R. 1993. *An Introduction to Agroforestry*. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. 543 p.
- Nedler, Meza, Torres y Jara. 2001. Medición del carbono almacenado de los bosques. Consultado 27/09/2009. En:
http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio_carbono/32_Nadler.PDF
- Nestel, David. 1995. Coffee in Mexico: international market, agricultural landscape and ecology. *Ecological Economics* 15: 165 – 178.
- Oliva, M. y F. García-Oliva. 1998. Un nuevo campo de acción en la química biológica: Parte I. Generalidades sobre el cambio global. *Educación Química*. UNAM. México. 79 Pág.
- Oelbermann, M., Voroney, P. R., y Gordon, M. A. 2004. Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and southern Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104: 359 – 377.
- Ordóñez, A. 1998. Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso para bosque templado: San Juan Nuevo, Michoacán. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias. UNAM. México D.F.



- Organización de las Naciones Unidas. 1992. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Nueva York. 50 p.
- Orlando, B., Baldock, D., Canger, S., Mackenses, J., Magininis, S., Socorro, M., Rietbergen, S., Robledo, C. y Schneider, N. 2002. Carbon forest and people: Towards the integrated management of carbon sequestration, the environment and sustainable livelihoods. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. Vi + 42 p.
- Petit, JR, Jouzel, J, Raynaud, D, Barkov, NI, Barnola, JM, Basile, I, Benders, M, Chappellaz, J, Davis, M, Delaygue, G, Delmotte, M, Kotlyakov, VM, Legrand, M, Lipenkov, VY, Lorius, C, Pépin, L, Ritz, C, Saltz-mann, E, & Stievenard, M. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399, 429–436.
- Perfecto, L., Rice, R. A., Greenberg, R., Van der Voort M. E. 1996. Shade Coffee: A disappearing refuge for biodiversity. *Bio Science*, Vol. 46, No. 8. 598 – 608.
- Perfecto, L., Vandermeer J., Mas, A., Soto Pinto, L. 2005. Biodiversity, yield, and shade coffee certification. *Ecological Economics* 54: 435 – 446.
- Pohlen, Jürgen. 2002. México y la Cultura Chiapaneca, reflexiones y alternativas para los caficultores. Die Deutsche Bibliothek – CIP – Einheit Saufnahme. Aachen Shaker (Berichteausder Agrarwissenschaft). 386 p.
- Rajagopal R. I. 2004. Estimación del secuestro de carbono en sistemas agroforestales a base de cítricos en el trópico húmedo mexicano. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. México 145p.
- Richards, P. W. 1996. The Tropical Rain Forest. Cambridge University Press. 2^{da} Ed. United kindom. 575 p.
- Rzendowski, J. 1978. Vegetación de México. Edit. Limusa. Pp. 432.
- Schelhaas, M. J., Esch Van P. W., Groen, T. A., de jong B. H. J., aniñen, M., Liski, J., Masera, O., Mohren, G. M. J., Nabuurs, G. J., Palosuo, T.,



modelling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystem. CATIE, Wageningen University. Wageningen. 49 p.

- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1994. Inventario Nacional Forestal Periódico. Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre. (SARH). México, D.F. 81 pp.
- Segura M., M. 1999. Valoración del servicio ambiental de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados del área de conservación cordillera volcánica central, Costa Rica. Tesis de maestría. Escuela de postgrado, programa de enseñanza para el desarrollo y la conservación, CATIE. Turrialba, Costa Rica. pp: 1-23.
- Schimel, D.S. 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle: Global Change Biology 1: 77-91.
- Schneider, S.H. 1989. The greenhouse effect: science and policy. Science, 243(10), 271-281.±
- Schroeder, P. 1994 Carbon storage benefits of agroforestry systems. Agroforestry Systems 27: 89–97.
- Schroth, G., y Sinclair, F. L. 2003. Trees, crops and soil fertility. Concepts and research methods. CABI Publishing. UK. 437 p.
- Soto – Pinto L., Perfecto I., Castillo-Hernández J., Caballero-Nieto J. 2000. Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico. Agriculture, Ecosystems and Environment. 80: 61–69: 977 – 987.
- Torres, J. A., B. Mayorga, V. N. May, M. Fernández y J. A. Gaytán. 2007. Compactación en diferentes sistemas de manejo del suelo en el CRUO (época de lluvias). En: INIFAP, UV, CP, UACH, ITUG, ITBOCA y UNAM (eds.). Avances en la investigación agrícola, pecuaria, forestal y acuícola en el trópico mexicano 2007. Libro científico # 4 ISBN 978-970-43-0240-5. Veracruz, México.
- UACH 2005. Acciones de Fomento productivo y mejoramiento de la calidad del café en México. Evaluación nacional externa. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Secretaría de Desarrollo Rural, Pesca y



Alimentación (SAGARPA). Consejo Mexicano del Café. Huatusco, VERACRUZ México. 104 p.

- UNFCCC. 2007. Climate Change Secretariat (UNFCCC.) and United Nations Environment Programme (UNEP) y. Climate change. 1997. information kit. Disponible en: <http://www.unep.ch/conventions>.
- Van Noordwijk M., Rahayu S., Hairiah K., Wulan Y. C., Farida A., y Verdist B. 2002. Carbon stock assessment for a forest – to – coffee conversion landscape in Sumber – Jaya (Lampung, Indonesia): from allometric equations to land use change analysis. Science in China Series C – Life Sciences 45: 75 – 86 Suppl. SCOCT 2002. Science in China Press, Beijing.
- Van Wagner, C. E. 1968. The line intersect method in forest fuel sampling. Forest science 14: 20 – 26.
- Villers R., L. e I. Trejo V. 1997. assessment of the vulnerability of forest ecosystems to climate change in Mexico. Climate Research 9:87- 93.
- Vine, E; Sathaye, J; Makundi, W. 1999. Guidelines for the monitoring, evaluation, reporting, verification, and certification of forestry projects for climate change mitigation. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. 125 p.
- Villers R., L.; Trejo V. 1997. Assessment of the vulnerability of forest ecosystems to climate change in Mexico. Climate Research 9:87- 93.
- Vitousek, P.M. Beyond global warming. Ecology and global change. Ecology 75(7)1861-1876.
- Walkley, A. and I. A. Black. 1934. An Examination of Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. Soil Sci. 37:29-3
- Woome, P. L. ; Palm, C. A. 1993. Shift in Cultivation effects of tropical soil Organic Matter. Experimental protocol prepared for the Global Initiative for Alternatives to Slash and Burn Agriculture. Tropical Soil Biology and Fertility Programme Nairobi, Kenya. Mimeografiado 35 p.



- World Wildlife Found (2002). Bosques y selvas de México. Disponible en línea: <http://www.wwf.org.mx> (última actualización: 29 de septiembre de 2005).
- <http://www.uacam.mx/epomex/Balamkin/html/flora%20y%20vegetacion.htm>. en línea 19-02-2007. 12:30 Hrs.
- <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/542/cap15.pdf>
- Young, Anthony. 1989. Agroforestry for soil management. 1ra Ed. CAB International. International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF). UK. 276 p.
- Young, Anthony. 1997. Agroforestry for soil management. 2da Ed. CAB International. International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF). UK. 320 p.
- Zulueta R., R. (1993). Atlas climático del municipio de Actopan (Estado de Veracruz) (Publicación Núm. 20). Xalapa, Ver., México: Instituto de Ecología.

Formato de recolección de información de campo

Comentarios:

**Densidad (Densidad aproximada de la madera)-A-alta, -M- media o baja -B-.