



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
AGRÍCOLA Y FORESTAL SUSTENTABLE**

TESIS DE MAESTRÍA

**DISTRIBUCIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO EN UN SISTEMA
AGROFORESTAL EN EL MUNICIPIO DE CHENALHÓ, CHIAPAS**

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

PRESENTA

Ing. Mario Abiquel Pérez Martínez

Director

Dr. Ramón Razo Zárate

Codirector

Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

Tulancingo de Bravo, Hgo., México, febrero de 2024



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
AGRÍCOLA Y FORESTAL SUSTENTABLE**

TESIS DE MAESTRÍA

**DISTRIBUCIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO EN UN SISTEMA
AGROFORESTAL EN EL MUNICIPIO DE CHENALHÓ, CHIAPAS**

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

PRESENTA

Ing. Mario Abiquel Pérez Martínez

Director

Dr. Ramón Razo Zárate

Codirector

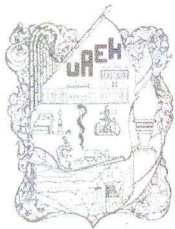
Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

Asesores

Dr. Juan Capulin Grande

Dr. Alfonso Suárez Islas

Tulancingo de Bravo, Hgo., México, febrero de 2024



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Agropecuarias

School of Forestry and Environmental Studies

Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

Master's in Sciences and Technology of Agriculture and Forestry

ICAP-MCTAFS/007/2024

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

PRESENTE

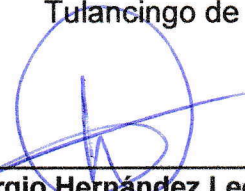
Por este conducto se le comunica que el Comité Revisor asignado al alumno **Mario Abiquel Pérez Martínez**, de la Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable, con número de cuenta **196041**, que presenta el manuscrito de tesis titulado "**DISTRIBUCIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO EN UN SISTEMA AGROFORESTAL EN EL MUNICIPIO DE CHENALHÓ, CHIAPAS**", ha autorizado la impresión del mismo.

Sin otro particular, reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.


ATENTAMENTE

"Amor, Orden y Progreso"

Tulancingo de Bravo, Hgo. a 19 de febrero del 2024.


Dr. Sergio Hernández León
Coordinador de la Maestría en
Ciencias y Tecnología Agrícola y
Forestal Sustentable

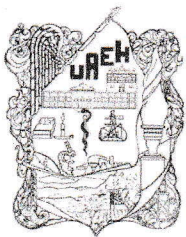



Dr. Armando Peláez Acero
Director del ICAP



Avenida Universidad Km. 1 s/n, Exhacienda Aquetzalpa
Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México; C.P. 43600
Teléfono: 771 71 72000 ext 2430
maestria_agricola_forestal@uaeh.edu.mx

www.uaeh.edu.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Agropecuarias

School of Forestry and Environmental Studies

Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

Master's in Sciences and Technology of Agriculture and Forestry

COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO DEL ICAP

Actas de la reunión del Comité de Tesis de Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

Apertura:

La reunión ordinaria para evaluar los avances de la tesis intitulada: "DISTRIBUCIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO EN UN SISTEMA AGROFORESTAL EN EL MUNICIPIO DE CHENALHÓ, CHIAPAS", que desarrolla el estudiante Mario Abiquel Pérez Martínez.

Asistentes:

Dr. Ramón Razo Zárate

Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

Dr. Juan Capulín Grande

Dr. Alfonso Suárez Islas

A. Revisión de Trabajo de Tesis

Observaciones:

El comité revisó con antelación el trabajo de tesis en extenso propuesto por **Mario Abiquel Pérez Martínez**, comunicando al estudiante, realizó oportunamente las correcciones, adiciones y/o modificaciones que debería considerar para mejorar su trabajo y poder continuar con el proceso de obtención de grado. El estudiante atendió de forma conveniente las sugerencias del comité.

B. Acuerdos

En esta fecha, se comunica atentamente que el comité conformado por los profesores firmantes, otorgamos nuestra autorización para que el estudiante imprima su trabajo final de tesis, y continúe con los trámites necesarios para la obtención del grado de maestría respectivo.

ATENTAMENTE

"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"

Tulancingo de Bravo, Hidalgo a 19 de febrero de 2024.

Dr. Ramón Razo Zárate

Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

Dr. Juan Capulín Grande

Dr. Alfonso Suárez Islas

DEDICATORIA

A mis Difuntos padres Agustina Martínez Bolom y Pedro Pérez Pérez por darme la vida y en vida por sus incansables sacrificios, esmero y por sus innumerables consejos otorgados hacia mi persona afín de alcanzar mis metas.

A mi esposa Benita Bolom González por su apoyo incondicional y las palabras de aliento, motivación en los momentos difíciles durante mi formación académica.

A mis hijos Mariana Guadalupe y Beymar Abiquel, por la comprensión, amor y apoyo incondicional que me han brindado en todo este tiempo, también por brindarme todos los momentos de aliento, felicidad y porque son mi motor en la vida.

A mi Hermano Luis por su confianza, amistad y por todos los apoyos que siempre me ha manifestado en todo momento y en especial durante mi preparación académica, siempre un ejemplo a seguir.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme el privilegio de existir, por tener salud y una familia. También por gracia de él se logró culminar esta fase de mi formación académica con éxito.

Al Área Académica de Ciencias Agrícolas y Forestales del Instituto de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por aceptarme en el programa de Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable y darme la oportunidad de continuar con mi preparación académica de posgrado.

Al CONAHCYT por otorgar el apoyo económico que me permitió realizar y terminar mi Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable.

Al Núcleo Académico Básico de la Maestría quienes aportaron mucho conocimiento, sabiduría en mi formación profesional y con ello, lograr una crítica más amplia en mi persona.

Al Dr. Ramón Razo Zárate director de esta investigación, por su confianza, dedicación, disponibilidad, apoyo y consejos antes y durante el proceso del presente trabajo de investigación.

Al Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna, Dr. Juan Capulín Grande, Dr. Alfonso Suárez Islas por formar parte de este comité de tesis, además por sus valiosas contribuciones que fueron parte fundamental en el logro del presente documento, también los consejos y ayuda incondicional recibida para mi formación académica y personal.

A la Dra. Eliazar Aquino Torres por su apoyo y orientación durante mi formación.

Al Dr. Reynol Fierros Mateo por su apoyo, palabras de aliento y motivación durante mi etapa de formación académica.

A mis compañeros de maestría Diana y Tomás por todo el apoyo brindado hacia mi persona.

A las personas que en este momento no menciono, pero estoy seguro que brindaron su ayuda incondicional durante mi formación y la culminación de la presente tesis.

¡Muchas gracias!

Índice general

Índice general	1
Índice de figuras	3
Índice de tablas	5
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
I. INTRODUCCIÓN	9
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
III. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	11
IV. JUSTIFICACIÓN	11
V. OBJETIVO GENERAL	13
V.1. Objetivos específicos	13
VI. HIPÓTESIS	13
VII. MARCO TEÓRICO	14
VII.1. Cambio climático	14
VII.2. Gases de efecto invernadero	15
VII.3. Dióxido de carbono atmosférico	18
VII.4. Ciclo del carbono	20
VII.5. Reservorio de carbono en los bosques	21
VII.6. Reservorio de carbono en sistemas agroforestales	22
VII.7. Biomasa	23
VII.8. Carbono orgánico del suelo	25
VII.9. Sistemas Agroforestales	27

VII.10. Producción de café bajo sistemas agroforestales	29
VIII. MATERIALES Y MÉTODOS	32
VIII.1. Ubicación y descripción del área de estudio	32
VIII.2. Esquema general del diseño de investigación	34
VIII.3. Recopilación de información en campo	35
VIII.4. Procesamiento de las muestras en la fase de laboratorio	40
VIII.5. Estimar volumen y biomasa en los componentes	43
VIII.6. Cuantificación de carbono en los componentes	48
VIII.7. Densidad aparente del suelo	49
VIII.8. Análisis estadístico	50
IX. RESULTADOS	51
IX.1. Especies presentes en el componente arbóreo y arbustivo	51
IX.2. Estimación de volumen en el componente arbóreo	53
IX.3. Determinación de biomasa en los componentes	57
IX.4. Concentración de carbono en los componentes	61
IX.5. Densidad aparente del suelo	64
IX.6. Almacenamiento de carbono en los componentes	65
X. DISCUSIÓN	71
XI. CONCLUSIONES	80
RECOMENDACIONES	81
XII. REFERENCIAS	82

Índice de figuras

Figura 1	Aumento de la temperatura media del planeta	15
Figura 2	Gases de efecto invernadero en la tierra	16
Figura 3	Emisiones de gases de efecto invernadero	17
Figura 4	Incremento en las concentraciones de dióxido de carbono atmosférico	19
Figura 5	Ciclo del carbono atmosférico	21
Figura 6	Producción de biomasa y almacenamiento de carbono en los bosques	24
Figura 7	Almacenamiento de carbono orgánico en el suelo	26
Figura 8	Fotografía del sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	28
Figura 9	Actividades culturales en los sistemas agroforestales con café	31
Figura 10	Ubicación del área de estudio, municipio de Chenalhó, Chiapas	32
Figura 11	Climograma de la estación meteorológica 00007033, Chenalhó, Chiapas	33
Figura 12	Esquema general de la metodología para la estimación de carbono almacenado en sistema agroforestal en Chenalhó, Chiapas	34
Figura 13	Obtención de datos dasométricos en árboles y arbustos en sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	36
Figura 14	Obtención de muestras compuestas en árboles y arbustos en sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	37

Figura 15	Obtención de muestras en el componente herbáceo y necromasa en sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	39
Figura 16	Obtención de muestras de suelo para determinar la concentración de carbono en sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	40
Figura 17	Secado de muestras de diferentes componentes de árboles, arbustos, herbáceas en la estufa de secado a 65 °C hasta alcanzar peso constante	41
Figura 18	Introducción de muestras molidas y tamizadas de cada componente de árboles, arbustos, herbáceas, necromasa y suelo al analizador de carbono elemental Thermo Scientific FLASH 2000 C-N Soils Analyzer	42
Figura 19	Pulverización y tamizado de las muestras de suelo para introducir al analizador de carbono elemental Thermo Scientific FLASH 2000 C-N Soils Analyzer	43
Figura 20	Relación de los datos de volumen observada en árboles mediante el modelo Korsun	54
Figura 21	Especies con mayor biomasa aérea del componente arbóreo en el sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	56
Figura 22	Relación de los datos de volumen observado en arbustos mediante el modelo Korsun.	58
Figura 23	Contenido de carbono orgánico en diferentes horizontes del suelo en el sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	68
Figura 24	Almacenamiento de carbono en un sistema agroforestal con café y árboles nativos en Chenalhó, Chiapas	69

Índice de tablas

Tabla 1	Clasificación de la densidad de la madera	46
Tabla 2	Densidad de madera de especies arbóreas y arbustivas presentes en el sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	46
Tabla 3	Abundancia de especies arbóreas y arbustivas presentes en el sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	51
Tabla 4	Especies arbóreas y arbustivas con mayor dominancia en sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	52
Tabla 5	Parámetros estimadores del modelo alométrico de Korsun para estimar volúmenes de los árboles	53
Tabla 6	Volumen y biomasa total aérea en árboles del sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	55
Tabla 7	Variables utilizadas para el procedimiento de comparación de correlación con el modelo Korsun para estimar volumen en los arbustos	57
Tabla 8	Biomasa aérea del componente arbustivo en el sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	59
Tabla 9	Biomasa en el compartimento herbáceo y necromasa en el sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	59
Tabla 10	Concentración de carbono en especies arbóreas del sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	61
Tabla 11	Concentración de carbono en especies arbustivas del sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	62
Tabla 12	Concentración de carbono en plantas herbáceas y necromasa del sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	62
Tabla 13	Contenido del carbono orgánico en diferentes horizontes del suelo del sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	63

Tabla 14	Almacenamiento de carbono aéreo en árboles del sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	65
Tabla 15	Almacenamiento de carbono aéreo en arbustos del sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	66
Tabla 16	Almacenamiento de carbono en herbáceas y necromasa del sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	67
Tabla 17	Contenido de carbono orgánico en el suelo por horizonte del sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	67
Tabla 18	Valores promedio en los cinco compartimentos en el sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas	69

RESUMEN

Los sistemas agroforestales son considerados como una alternativa de producción amigable con el ambiente y han establecido gran relevancia en los últimos tiempos por la generación de servicios económicos y ecológicos, ya que permite almacenar grandes cantidades de carbono en los diferentes compartimentos que contribuye a la mitigación del calentamiento global. Por lo que, en el presente estudio se planteó el objetivo, cuantificar el contenido de carbono en biomasa aérea y suelo mediante métodos combinados para proponer diseños que permitan potencializar los servicios ambientales en los sistemas agroforestales con café en Chenalhó, Chiapas. La superficie evaluada fue de una hectárea y la obtención de datos dasométricos en árboles (diámetro normal y altura) y arbustos (diámetro basal y altura) fue mediante un censo para luego aplicar ecuaciones alométricas, en tanto, las herbáceas y necromasa se hizo mediante muestreos sistemático directo de 1x1 m y para la cuantificación en suelo se realizó el perfil de suelo hasta un metro de profundidad mediante el método de zig-zag. Se realizaron análisis de varianza y comparación de medias por el método de Tukey. En los resultados obtenidos se encontró que las especies con mayor porcentaje de concentración carbono fueron *Pinus maximinoi*, *Myrsine coriacea* y *Quercus crispipilis* con 49.02, 50.91 y 52.6%, respectivamente. El almacenamiento de carbono aéreo fue de 45.90 Mg C ha⁻¹ en árboles, 1.72 Mg C ha⁻¹ en arbustos, 4.69 Mg C ha⁻¹ en herbáceas, 5.33 Mg C ha⁻¹ en necromasa y 263.11 Mg COS ha⁻¹ en suelo. Se concluye que el sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas almacena hasta 320.75 Mg C ha⁻¹. De los cuales 55.93 Mg C ha⁻¹ se encuentran en el componente sobre el suelo y 283.99 Mg se encuentran como carbono orgánico en el suelo en una hectárea.

Palabras clave: Concentración de carbono, almacenamiento de carbono, sistemas agroforestales, carbono orgánico en el suelo, árboles forestales nativas, plantas de café, arbustos, necromasa.

ABSTRACT

Agroforestry systems are considered an environmentally friendly production alternative and have established great relevance in recent times for the generation of economic and ecological services, since they allow large amounts of carbon to be stored in the different compartments that contribute to climate mitigation. global warming. Therefore, in the present study the objective was set: to quantify the carbon content in aerial biomass and soil using combined methods to propose designs that allow the potentialization of environmental services in agroforestry systems with coffee in Chenalhó, Chiapas. The area evaluated was one hectare and the dasometric data on trees (normal diameter and height) and shrubs (basal diameter and height) was obtained through a census to then apply allometric equations, while herbaceous and necromass was done through sampling. direct systematic of 1x1 m and for soil quantification, the soil profile was carried out up to one meter deep using the zig-zag method. Analysis of variance and comparison of means were performed using the Tukey method. In the results obtained, it was found that the species with the highest percentage of carbon concentration were *Pinus maximinoi*, *Myrsine coriacea* and *Quercus crispipilis* with 49.02, 50.91 and 52.6%, respectively. The aerial carbon storage was 45.90 Mg C ha⁻¹ in trees, 1.72 Mg C ha⁻¹ in shrubs, 4.69 Mg C ha⁻¹ in herbaceous plants, 5.33 Mg C ha⁻¹ in necromass and 263.11 Mg COS ha⁻¹ in floor. It is concluded that the agroforestry system with coffee in Chenalhó, Chiapas stores up to 320.75 Mg C ha⁻¹. Of which 55.93 Mg C ha⁻¹ is found in the above-ground component and 283.99 Mg is found as organic carbon in the soil in one hectare.

Keywords: Carbon concentration, carbon storage, agroforestry systems, soil organic carbon, native forest trees, coffee plants, shrubs, necromass.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han observado variaciones en la temperatura ambiental al presentar eventos climáticos anormales como las olas de calor, frecuencias de lluvias, así que, a finales del siglo XIX, especialistas en el tema observaron un aumento gradual en la temperatura media de la superficie del planeta. Se estimó que el incremento de temperatura media mundial en los años 90 se sitúa entre 0.5 °C a 1.0 °C con respecto a los niveles preindustriales y es probable que llegue a 1.5 °C entre 2030 y 2052 si continúa aumentando al ritmo actual (IPCC, 1996; IPCC, 2018).

La causa de este fenómeno se debe al incremento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, por las diferentes actividades antropogénicas como deforestación por el cambio de uso del suelo destinadas a la urbanización, agricultura, procesos industriales, producción de energía, además de la quema de combustibles fósiles, desechos, etc. Estudios realizados indican que la actividad agrícola aporta entre 30-35% de las emisiones totales de GEI (Saynes *et al.*, 2016). Los principales GEI emitidos en todo el mundo son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) (Villalobos y Pratt, 1999; Saynes *et al.*, 2016). El CO₂ es el gas con efecto invernadero de mayor relevancia que contribuye al cambio climático debido principalmente a la utilización de combustibles de origen fósil y los cambios de uso del suelo como la agropecuaria (IPCC, 2007).

Los agroecosistemas también tienen gran potencial de mitigar la acumulación CO₂ atmosférico, es a través de la captura del carbono mediante la fotosíntesis, y mantenerlo el mayor tiempo posible almacenado en la biomasa aérea (vegetaciones naturales, secundarias, sistemas agroforestales) y en el suelo como carbono orgánico. En la fase de fotosíntesis, la planta asimila CO₂ atmosférico, forma carbohidratos y aumenta su volumen (Espinoza-Domínguez *et al.*, 2012).

Los sistemas agroforestales (SAF) son espacios con importante valor para el almacenamiento de carbono y de acuerdo con Nair (1993), define que un SAF es una disciplina que permite el uso de tierra en donde se emplean tecnologías combinando

especies perennes como árboles, arbustos con cultivos de ciclo corto como las agrícolas y/o animales en un determinado espacio, produciendo diversos beneficios sociales, económicas y ecológicas. La acumulación de carbono en SAF es más evidente en la biomasa de árboles y arbustos (Montagnini y Nair, 2004).

La capacidad de almacenamiento de carbono en los SAF depende de varios factores como el clima, ubicación geográfica, estratos, arreglos espaciales y temporales de las plantas, así como los componentes vegetales, sin embargo, los estudios relacionados con el tema mencionan que el almacenamiento de carbono en los SAF comprende aproximadamente a 9, 21, 50 y 63 Mg C ha⁻¹, en biomasa aérea y raíces de regiones semiáridas, subhúmedas, húmedas y templadas, respectivamente, y el carbono en todos los almacenes se estima entre 12 y 228 Mg C ha⁻¹ (Schroeder, 1994). Precisamente, en sistemas agroforestales con cacao, con café y silvopastoril en Colombia, albergan 88.6, 57.8 y 60.0 Mg C ha⁻¹, tanto en biomasa aérea como en el suelo a la profundidad de 20 cm (Hernández-Núñez *et al.*, 2021).

El sistema agroforestal tradicional con café es la principal actividad de producción en Chenalhó, Chiapas, también los servicios ambientales que proveen en estos agroecosistemas son importantes como la regulación hidrológica, dendroenergética, captura de carbono. De modo que, esta última, hace falta realizar estimaciones para conocer la capacidad de almacenar carbono en estos sistemas, así como identificar las especies con mayor potencial de captura de carbono.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La agroforestería es el nombre genérico asignado para describir una forma de uso de la tierra en el que se combinan los árboles de forma cronológica y espacial con cultivos agrícolas y/o animales en un mismo espacio (Pereira-Morales *et al.*, 2011). Estos sistemas han tenido mucha relevancia en las últimas décadas puesto que proveen diversos beneficios ecológicos (como captura de carbono) y económicos a nivel familiar hasta escalas globales. En el contexto de la estimación de captura de carbono en estos sistemas se ha documentado, sin embargo, en el área de interés carece de datos y estudios, que permitan darles mayor valor a estos tipos de uso de la tierra por las contribuciones que aportan en la mitigación del calentamiento global.

III. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

- ¿Cuánto carbono se almacena en un Sistema Agroforestal con café?
- ¿Cuáles son las especies forestales con mayor eficiencia en la captura y almacenamiento de carbono?
- ¿Cuál compartimento del sistema agroforestal tiene mayor contenido de carbono?

IV. JUSTIFICACIÓN

En México existen diversas conformaciones de sistemas agroforestales y de acuerdo con los estudios realizados por Moreno-Calles *et al.* (2013), identificaron 20 sistemas agroforestales tradicionales, así como gran diversidad de flora que se alberga en un sitio de hasta 1400 especies de plantas útiles (Caballero *et al.*, 2010).

En el área de estudio se aprecia diversidad de plantas arbóreas y arbustivas que forman parte de los sistemas agroforestales. Dicho sistema está destinado principalmente a la producción de café (*Coffea arabica* L.). De Jong *et al.* (1997), menciona que los sistemas agroforestales presentan gran potencial de captura de carbono, siendo las zonas tropicales con mayor capacidad de almacenamiento que

oscila entre 60 a 140 Mg C·ha⁻¹, mientras que en las zonas subtropicales puede capturar entre 40 a 80 Mg C·ha⁻¹.

El contenido de carbono orgánico del suelo en climas secos y semicálidos oscila entre 34.7 Mg C·ha⁻¹ a 168.7 Mg C·ha⁻¹ (Balbontín *et al.*, 2009). Dado que en el área de interés se carece de estudios sobre estimación de contenido y potencial de almacenamiento de carbono en los sistemas agroforestales, por lo que, esta propuesta de investigación presenta gran relevancia en la estimación de carbono secuestrado y almacenado por especies forestales y plantas de café que permitirá abordar perspectivas sobre el diseño de nuevos sistemas agroforestales que incluyen especies de árboles con mayor potencial de captura y almacenamiento de carbono, haciendo más eficientes los SAF para la mitigación de calentamiento global.

V. OBJETIVO GENERAL

Cuantificar el contenido de carbono en biomasa aérea y suelo mediante método destructivo y no destructivo para proponer diseños de combinación de especies que permitan potencializar los servicios ambientales con sistemas agroforestales en Chenalhó, Chiapas.

V.1. Objetivos específicos

- Determinar el contenido de carbono en árboles, arbustos, plantas de café, herbáceas y necromasa del SAF con café.
- Determinar el contenido de carbono orgánico en cada horizonte del suelo.
- Comparar el contenido de carbono entre los componentes aéreos (árboles, arbustos, herbáceas y necromasa) y suelo.
- Identificar especies de árboles forestales nativos con mayor potencial de captura y almacenamiento de carbono.

VI. HIPÓTESIS

Ho: Los sistemas agroforestales con café y las especies forestales nativas varían en el potencial de capturar y almacenar carbono en el componente aéreo para proponer diseños de combinación de especies que permitan potencializar los servicios ambientales con sistemas agroforestales en Chenalhó, Chiapas.

VII. MARCO TEÓRICO

VII.1. Cambio climático

El aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera ha influido en el incremento de la temperatura media mundial dando lugar al cambio climático (National Geographic, 2023). El cual, se define como un cambio estable y durable en la distribución de los patrones de clima en periodos de tiempo que modifica la temperatura del planeta, que van desde décadas hasta millones de años, causado por factores naturales o antrópicos, tales como la quema de combustibles fósiles, que se manifiesta en la composición de la atmósfera o en cambios en el uso del suelo y afecta a plantas y animales (The Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2001).

El cambio climático influye directamente en el calentamiento global del planeta, esto es, el calentamiento global es la manifestación más evidente del cambio climático y se refiere al incremento promedio de las temperaturas terrestres y marinas globales (IPCC, 2013a). A pesar de la enorme diferencia de temperatura entre los polos de la tierra y el ecuador, además, de las variaciones entre invierno y verano, el clima de nuestro planeta es relativamente estable. La temperatura media mundial es de 15 °C (CONABIO, 2023). Los últimos informes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) señalan que la temperatura del planeta se ha incrementado 0.74 °C en los últimos 100 años (Figura 1), sin embargo, en 2023 se registró un aumento de la temperatura media mundial de 1.45 °C respecto a los niveles preindustriales (Organización Meteorológico Mundial [OMM], 2024). Si continúa en incremento en los próximos años podría alcanzar hasta 2.2 °C en 2040 en comparación con los niveles registrados en la época preindustrial y se esperan efectos adversos en la biodiversidad, salud, agricultura, así como toda la vida existente en el planeta y que podría ser difícil de cuantificar los daños.

Uno de los factores que más incide en el cambio climático es la deforestación, desde hace más de 100 años se ha dado un proceso acelerado de pérdida de la cobertura forestal en el mundo y se calcula que, México perdió por lo menos la mitad de sus bosques desde la época de la Colonia hasta la actualidad. México ha talado 6.3

millones de hectáreas de los bosques naturales, ocupando el segundo lugar en América Latina en la devastación de la masa forestal, solo después de Brasil que ocupa el primer lugar (Conde, 2011). Esto contribuye a las emisiones de los gases de efecto invernadero.

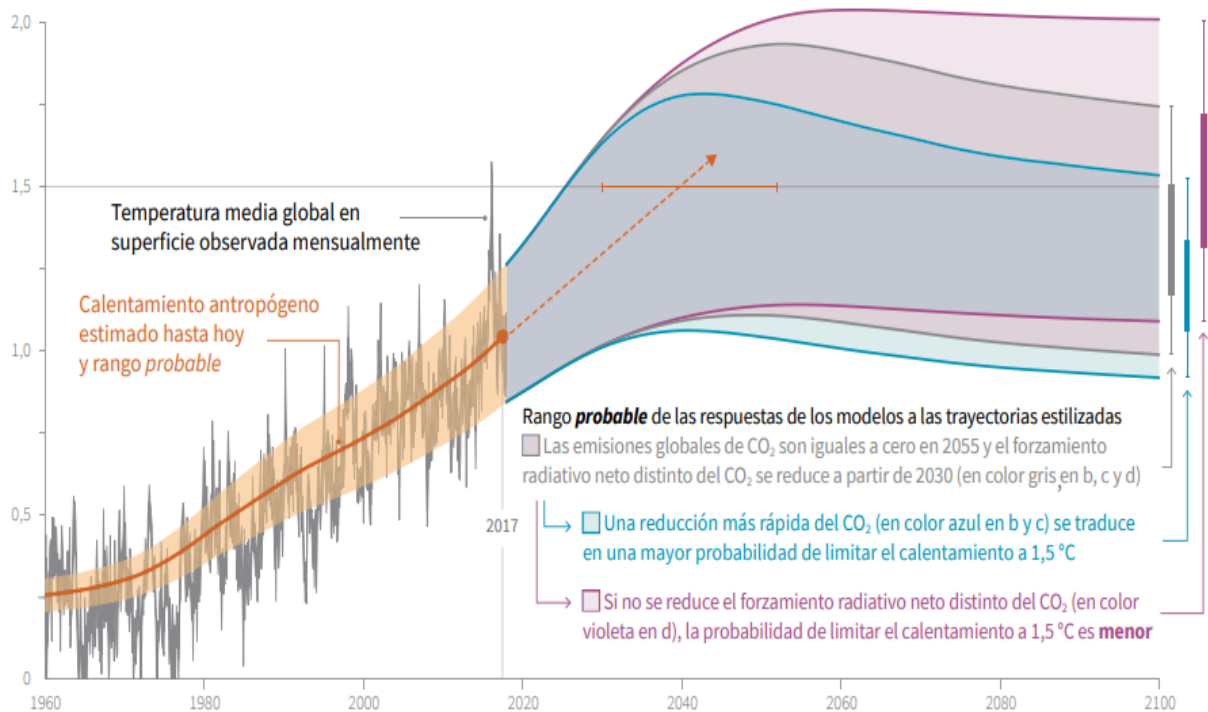


Figura 1. Aumento de la temperatura media del planeta. Fuente: IPCC, 2018.

VII.2. Gases de efecto invernadero

Efecto Invernadero, se refiere a un mecanismo por el cual la atmósfera de la tierra se calienta, y es un aspecto que ha existido desde que el planeta tiene atmósfera, y que ha permitido la existencia de la vida en este planeta (Caballero *et al.*, 2007), dicho efecto se debe a la presencia de diversos gases.

El IPCC define a los gases de efecto invernadero (GEI) como el componente gaseoso del ambiente de proveniente de forma natural o antropogénico, que absorbe y transmite radiación infrarroja térmica emitida por la superficie terrestre hacia la atmósfera y por las nubes (IPCC, 2013b). A los gases de efecto invernadero (GEI) se le atribuyen su

nombre porque calientan la superficie terrestre de forma similar a las acciones de un vidrio que elevan la temperatura interior de los invernaderos mediante la emisión proveniente del sol (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2018), manteniendo una temperatura media global de 15 °C, caso contrario, la temperatura promedio sería inferior a los -18 °C (Figura 2).



Figura 2. Gases de efecto invernadero en la tierra. Fuente: Mundo verde, 2015.

En condiciones normales, la atmósfera se compone de la mezcla de gases en la que dominan el nitrógeno (78.1%) y el oxígeno (20.9%), así como pequeñas cantidades de argón (0.93%). Con la intensa actividad volcánica fue cambiando su composición con vapor de agua (0.247%), bióxido de carbono (0.038%) y en menor cantidad hidrógeno, helio y otros gases (CONABIO, 2023; SEMARNAT, 2023). Estas composiciones forman parte del ciclo natural del planeta. Sin embargo, actividades antropogénicas como la quema de combustibles fósiles y la deforestación intensifican el efecto invernadero natural (Figura 3), al incrementar las emisiones de gases de efecto invernadero y modificar con ello la composición de la atmósfera del planeta (INECC, 2018) e incrementa la temperatura media global y por efecto causan daños en la salud de los seres vivos en la tierra (Martínez *et al.*, 2020).

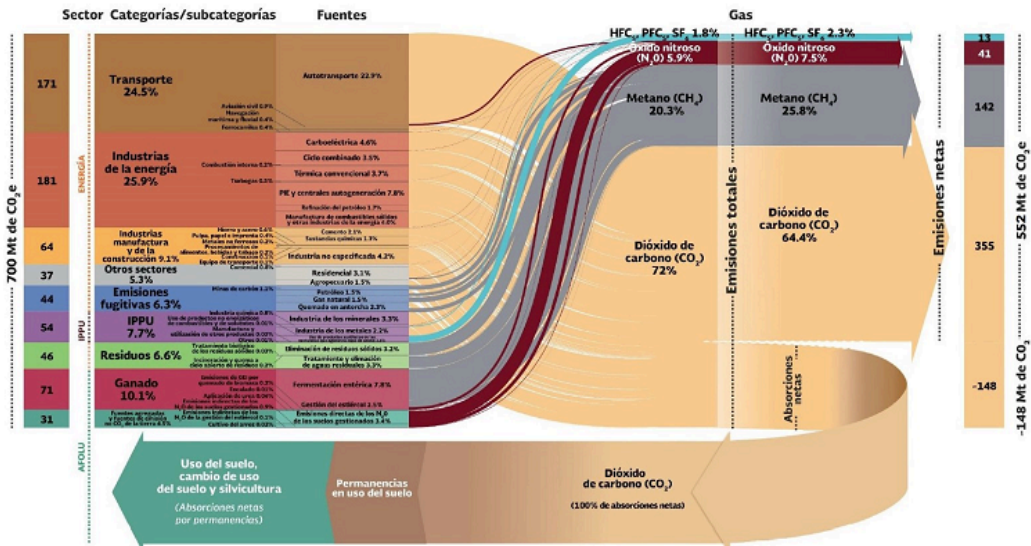


Figura 3. Emisiones de gases de efecto invernadero. Fuente: INECC y SEMARNAT, 2015.

En el ámbito internacional, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) fue creada en la ciudad de Nueva York el 9 de mayo de 1992 y entró en vigor el 21 de marzo de 1994 con la finalidad de afianzar la conciencia pública en todo el mundo, sobre las dificultades relacionadas con el cambio climático y obtener la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera a niveles que imposibiliten la interferencia humana (Martínez *et al.*, 2020).

Existen una serie de gases de efecto invernadero que es provocado por las actividades del ser humano, que, en consecuencia, interviene en el desgaste de la capa de ozono en la atmósfera, estos permanecen en la atmósfera por periodos diferentes, dependiendo de su capacidad para absorber el calor con efectos distintos. El planeta ha venido experimentando un aumento constante en las concentraciones atmosféricas, causada principalmente por el conjunto de actividades productivas que realiza el ser humano. Las acumulaciones de óxido nítrico (H₂O), dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), son considerados como los principales elementos de los gases de efecto invernadero (Le Treut *et al.*, 2007). Estos GEI representan menos del 1% de la

atmósfera, pero este pequeño porcentaje es suficiente para producir un efecto invernadero natural que puede mantener el planeta unos 30 °C más caliente que en su ausencia y es esencial para la vida (Mendoza y Jiménez *et al.*, 2017).

De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero en México, las emisiones de gases por actividades antropogénicas en 2019 se estimaron en 736.63 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) que incluyen las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (H₂O), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorocarburos (PFCs), trifluoruro de nitrógeno (NF₃) y hexafluoruro de azufre (SF₆), multiplicados por su potencial de calentamiento global (INECC, 2021).

Se estima que los seres humanos son responsables del 90% aproximadamente de la combustión de biomasa, principalmente, a través de la quema deliberada de vegetación forestal, asociada con la deforestación, a la quema de residuos agrícolas para favorecer el crecimiento de nuevos rebrotes (pastos) y control de insectos y/o plagas. Los enormes incendios forestales que se produjeron en el Asia meridional en 1997 quemaron al menos 4.5 millones de hectáreas y cubrieron la región con un manto de humo y neblina (Mendoza y Jiménez, 2017). 2011 fue otro año catastrófico con 11,992 incendios que quemaron 953,230 hectáreas; siguiendo esta secuencia, en 2017 se produjeron 8,007 incendios que afectaron a 716,023 hectáreas y el 2019 se registraron 7,003 incendios que afectaron a 600,000 hectáreas (Pérez, 2019).

VII.3. Dióxido de carbono atmosférico

De todos los gases de efecto invernadero, el dióxido de carbono (CO₂) es de las más importante que contribuye a la GEI y su principal procedente del CO₂, se debe a la extracción y quema de combustibles fósiles (como carbón, petróleo y gas natural), además de incendios forestales, agricultura, ganadería y las erupciones volcánicas, mediante procesos de fermentación, respiración y combustión. Las características del dióxido de carbono (CO₂) es que en condiciones naturales es un gas inodoro e incoloro que está compuesto por un átomo de carbono y dos de oxígeno unidos por enlaces

covalentes, es decir, cuenta con enlace doble por lo que la unión entre los elementos es más fuerte (Arroyo y Ramírez-Monroy, 2020).

Desde el comienzo de la era industrial (en el siglo XVIII), las actividades humanas han aumentado el CO_2 atmosférico hasta en un 50%, lo que significa que la cantidad de CO_2 ahora es el 150 % de su valor en 1750 (Figura 4). En los últimos 200 años se han registrado los mayores aumentos de CO_2 en la atmósfera (IPCC, 2007). Este aumento, afecta la autorregulación de la naturaleza a niveles equilibrados de las concentraciones de dichos gases en la atmósfera (Sandoval *et al.*, 2003).

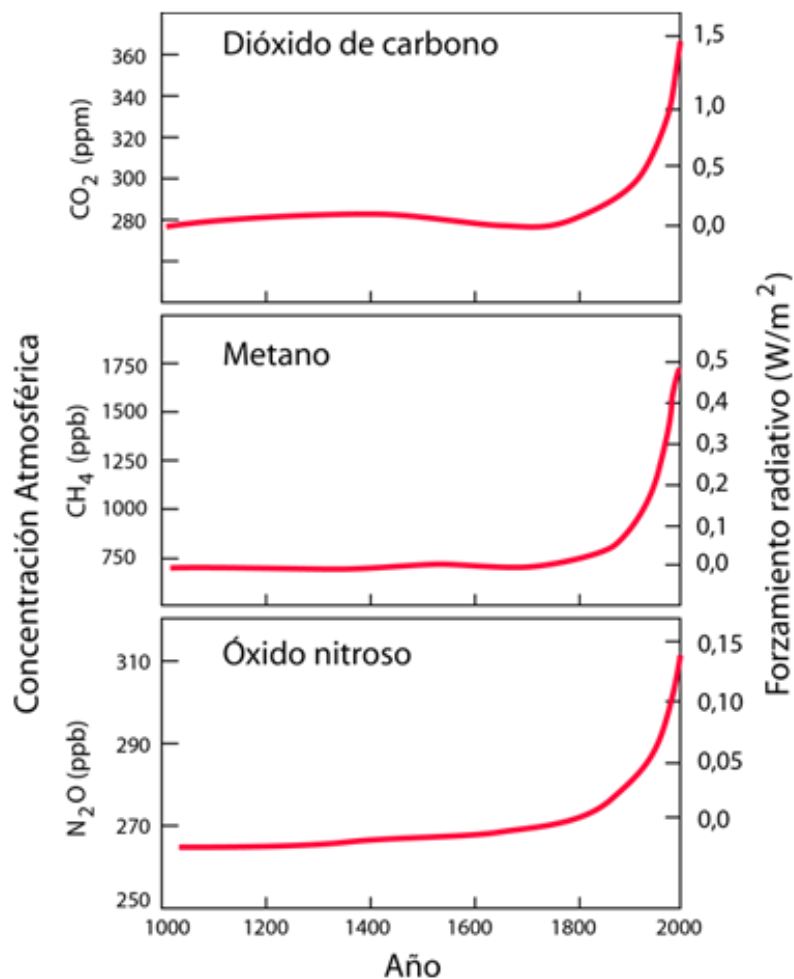


Figura 4. Incremento en las concentraciones de dióxido de carbono atmosférico. Fuente: IPCC, 2007.

El CO₂ es el componente gaseoso con especial incidencia sobre las condiciones climáticas del planeta. Esto se debe a que es un gas de larga permanencia, es decir, que la molécula de este gas no se degrada fácilmente y permanece activo en la atmósfera durante mucho tiempo. Se estima que una emisión de CO₂ a la atmósfera, el 50% tardará 30 años en desaparecer, un 30% permanecerá varios siglos y el 20% restante durará varios millares de años (Solomon *et al.*, 2007). No obstante, las plantas en su mayoría necesitan el dióxido de carbono, agua y luz solar para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis para su desarrollo. Sin embargo, las concentraciones aún están en aumento y provocan graves consecuencias en los ecosistemas, en las personas y en la vida general del planeta.

VII.4. Ciclo del carbono

En la naturaleza el carbono se encuentra en cualquier parte del planeta, está presente en el agua, las rocas, los sedimentos, el manto, el núcleo, los organismos vivos y la atmósfera, bajo la forma de compuestos carbónicos disueltos (los carbonatos), y en el aire como dióxido de carbono o anhídrido carbónico. Cada lugar tiene su propio ciclo de transformación y procesos de alta complejidad química y física (Mondragón, 2021).

Todos los organismos vivos están formados por compuestos de carbono obtenidos mediante procesos metabólicos durante el crecimiento y el desarrollo y liberados después de la muerte. Aproximadamente el 50% del peso seco de cualquier organismo vivo consiste en este elemento, lo que lo convierte en uno de los elementos más importantes de la vida (Smith *et al.*, 1993).

La principal forma del movimiento del carbono en cada uno de los ciclos es a través del CO₂ (Gálvez *et al.*, 2020), lo que permite la transformación de carbono inorgánico a carbono orgánico y que permitió el inicio de la vida en la Tierra. El ciclo del carbono comienza con la fijación del dióxido de carbono atmosférico por las plantas conocido como fotosíntesis, esto, adquieren el CO₂ a través de las hojas por medio de las estomas para llevar a cabo el proceso (Figura 5), en esta etapa el CO₂ y el agua reaccionan para formar carbohidratos y liberar oxígeno en forma simultánea, además

de alimentos y energía para el sostenimiento de la vida (Hartmann *et al.*, 2013; Gálvez *et al.*, 2020).

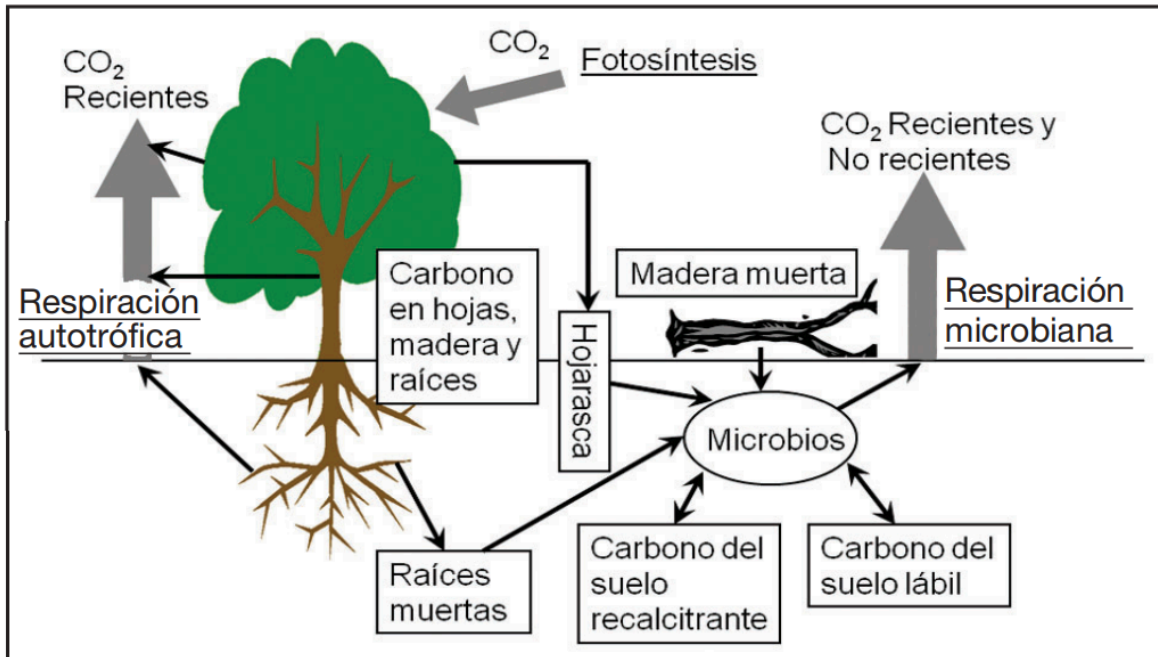


Figura 5. Ciclo del carbono atmosférico. Fuente: Ryan *et al.*, 2010.

La cantidad de carbono que se fija, se convierte en carbohidratos durante la fotosíntesis se conoce como producción primaria bruta (PPB). La mitad de la PPB se incorpora en los tejidos vegetales, como hojas, raíces y tejido leñoso, y la otra mitad regresa a la atmósfera como CO_2 debido a la respiración de los tejidos vegetales (Carbajal *et al.*, 2017). El crecimiento anual de las plantas es el resultado de la diferencia entre el carbono fijado y el respirado, a esto, se le conoce como producción primaria neta (PPN).

VII.5. Reservorio de carbono en los bosques

Los ecosistemas forestales son considerados la principal fuente de madera e importante depósito de energía, cuya permanencia depende en gran medida de que no se manifiesten fenómenos naturales y antropogénicos que afecte la composición de los bosques, tal como lo indican los 3,400 millones de metros cúbicos anuales de

extracción de madera a nivel mundial registrada en 2005 (FAO, 2005). Además, los bosques proveen de diversos servicios ambientales como la captura y almacenamiento de carbono. Esta última, es fundamental para mantener el equilibrio y la funcionalidad del ambiente. Los bosques forman parte importante del almacenamiento de carbono al funcionar como reservorio, no solo en la parte aérea sino también en el suelo (Chazdon *et al.*, 2007). En ello, conforman el depósito más grande de carbono orgánico el cual se almacena en el suelo, en la biomasa (sobre y debajo del suelo), en la madera muerta, y en el mantillo (Navarrete *et al.*, 2011).

Los bosques del mundo son el almacén principal de C terrestre, ya que almacenan 861 petagramos (Pg) C (1 Pg = 10^{15} g) (Pan *et al.*, 2011). Este gran almacén de carbono está dividido en diferentes componentes, el 44% (383 Pg C) está en el suelo (1 m de profundidad), el 42% (363 Pg C) en la biomasa (aérea y subterránea), el 8% (73 Pg C) en los árboles muertos y el 5% (43 Pg C) en el mantillo, aunque esta disgregación depende del tipo de bioma, la composición de especies y la intensidad de aprovechamiento, por lo que se hace necesario emprender estrategias para su conservación y manejo (Pan *et al.*, 2011).

El INECC (2012), citado por INECC-PNUD México, (2017), menciona que los bosques mexicanos tienen potencial teórico de abatimiento de emisiones de 57 Mt CO₂, basado en alternativas para evitar la pérdida de cobertura forestal a través de la implementación de reforestaciones y actividades para evitar la deforestación. Se estima que el total de carbono almacenado en México es de 1.29 gigatoneladas de CO₂; siendo el almacenamiento promedio de carbono de 416.9 y 1413. Mg C ha⁻¹ para el carbono aéreo y subterráneo respectivamente (Gómez *et al.*, 2022).

VII.6. Reservorio de carbono en sistemas agroforestales

Los sistemas agroforestales presentan ventajas frente a los sistemas de producción tradicionales. Esto se debe a que, brindan diversos bienes y servicios ambientales entre los que destacan el mantenimiento de la fertilidad del suelo, reducción de la erosión de la misma, aporte y mantenimiento de nutrientes y favorece el microclima,

conservación del agua, captura y almacenamiento de carbono; favorece la conservación de la biodiversidad. Además, suministra leña, madera y frutos para los poseedores del terreno (Beer *et al.*, 2003).

De acuerdo con los estudios realizados en los SAF son grandes reservorios de carbono, Schroeder (1994), afirma que los sistemas agroforestales presentan diferentes capacidades de contener carbono en función de la zona, en tanto, las zonas semiáridas, subhúmedas, húmedas y templadas almacenarán 9, 21, 50 y 63 Mg C ha⁻¹ respectivamente, incluidas la biomasa aérea y raíces. Además, Rajagopal (2004), menciona que el C almacenado en SAF en combinaciones con cítricos, con café y plátano, cítrico con café, cítrico en potrero y cítrico con plátano fueron 196, 186, 181 y 144 Mg C ha⁻¹, respectivamente. El C contenido en la biomasa aérea varió entre 41 y 75 Mg C ha⁻¹; la mayor cantidad de reservorio se encontró en los árboles, siendo cinco veces mayor al C almacenado en los arbustos y hierbas. La distribución del C mostró amplias variaciones por el tipo de especies arbóreas, densidad, regímenes de manejo y edad de los sistemas (Espinoza-Domínguez *et al.*, 2012).

Los diferentes usos del suelo y las prácticas o combinaciones de las agrícolas y forestales presentes en una determinada área condicionan el potencial de captura y almacenamiento de carbono. A mayor complejidad de un sistema habitualmente favorece en gran medida la acumulación de C, en tanto, un barbecho enriquecido puede secuestrar más C que un área de milpa (Roncal-García *et al.*, 2008), en función del aporte de la materia orgánica al sistema.

VII.7. Biomasa

La biomasa se refiere a cualquier materia orgánica de origen animal y/o vegetal por procesos biológicos (Kumar *et al.*, 2015). La biomasa en las plantas se presenta como resultado del proceso de conversión fotosintético, es decir, es la cantidad total de materia viviente o muerto, en un momento dado, en un área determinada o en uno de sus niveles tróficos y se expresa en gramos o kilogramos por unidad de superficie. El aumento de biomasa en un período determinado recibe el nombre de producción de un

sistema o de un área determinada (Pineda, 2007). La biomasa en la fotosíntesis se obtiene del resultado a partir de la transformación de la energía solar en energía química (Martínez-Romero y Leyva-Galán, 2014).

Las plantas, como organismos autótrofos, tienen la capacidad de sintetizar su propia masa corporal o biomasa a partir de la fotosíntesis (Martínez-Romero y Leyva-Galán, 2014). Durante esta fase (proceso de óxido-reducción) se absorbe la energía solar en la clorofila y se transforma el dióxido de carbono (CO_2) del aire y el agua del suelo en carbohidratos que almacenan energía química, mediante el proceso de conversión fotoelectroquímica de la fotosíntesis (Bustamante-García *et al.*, 2013). El resultado de esta actividad, los tejidos vegetales, establecen la producción primaria. El conocimiento sobre la cantidad de biomasa presente en los componentes aéreos (árboles, arbustos, hierbas, necromasa) es importante para determinar el valor que desempeñan los recursos naturales en el almacenamiento de carbono (Figura 6). El carbono secuestrado por la biomasa vegetal suele corresponder a un 50-60 % de la materia orgánica (Sánchez, 2010).

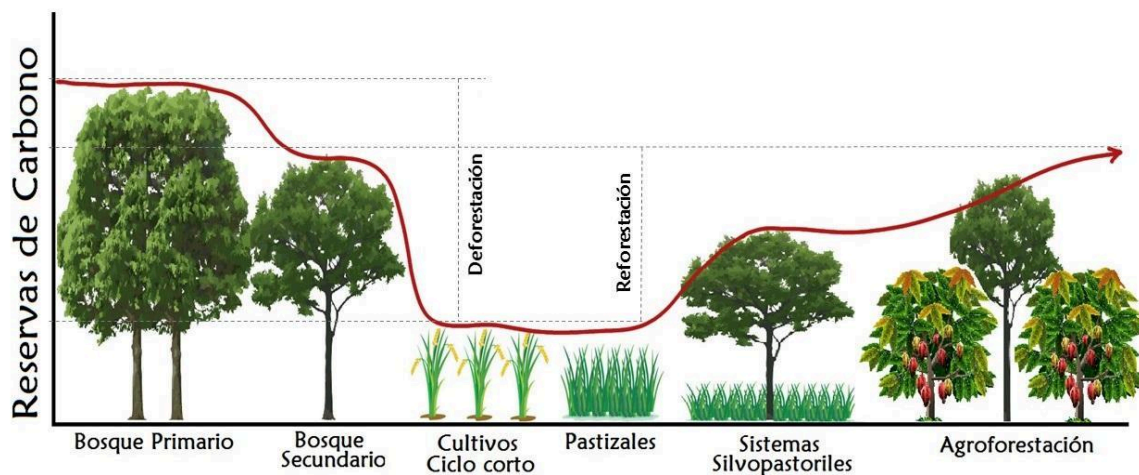


Figura 6. Producción de biomasa y almacenamiento de carbono en los bosques. Fuente: Alliance of Bioversity & CIAT, 2017.

La estimación de biomasa vegetal puede ser mediante métodos destructivos que consiste en la corta del material de interés o bien a través de técnicas no destructivas

por modelos alométricos. Estas ecuaciones alométricas, habitualmente se emplean a nivel de especie, sin embargo, se han generado modelos que integran a varias especies, debido a la similitud en los patrones de crecimiento en determinados ambientes (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2007). La acumulación de biomasa en una unidad determinada está en función de las características propias de sitio y el uso actual del área. A pesar de ello, los bosques templados pueden contener hasta 130.28 Mg ha⁻¹ de biomasa (Graciano-Ávila *et al.*, 2019) y 124 Mg ha⁻¹ para un bosque tropical del centro de México (Jaramillo *et al.*, 2003). La biomasa forestal interfiere en diversos beneficios medioambientales como la transferencia de energía, fertilidad del suelo, acumulación de carbono, entre otros.

VII.8. Carbono orgánico del suelo

El suelo se ha convertido en uno de los recursos naturales más vulnerables del mundo ante el cambio climático provocado por la degradación de los espacios favoreciendo la pérdida de biodiversidad. Sin embargo, es una importante reserva de carbono, conteniendo más carbono que la atmósfera y la vegetación terrestre en conjunto (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura [FAO], 2017). Los suelos pueden coadyuvar a los esfuerzos tendientes a disminuir el cambio climático (Agencia Europea del Medio Ambiente, 2015) mediante el almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) en los horizontes de la misma.

El carbono orgánico del suelo (COS) corresponde a una pequeña fracción del ciclo global del carbono presente en el suelo, la vegetación, el océano y la atmósfera. El COS se encuentra en diferentes etapas de humificación, con plazos de recambio que alcanzan cientos o incluso miles de años (Burbano, 2018). Esto, depende de varios factores tanto abióticos como bióticos. La primera influye los factores de clima como la precipitación y la temperatura entre otros, mientras que la segunda depende de la actividad biológica, tipo de material depositado y en general puede alcanzar varios años para su humificación completa.

El material orgánico muerto (principalmente en forma de residuos vegetales y exudados) es incorporado al suelo (Figura 7), lo que conlleva la entrada de carbono en el suelo a través de la transformación del material orgánico por las actividades de los microorganismos heterótrofos. Al referirse al CO₂, el secuestro de COS implica tres fases: 1) la extracción del CO₂ de la atmósfera mediante la fotosíntesis de los autótrofos; 2) la transición de carbono del CO₂ a la biomasa vegetal; y 3) la transferencia de carbono de la biomasa vegetal al suelo donde se almacena en forma de COS en la reserva más lábil (FAO, 2017). Por sus variados orígenes el COS no es un material homogéneo, por lo tanto, se categoriza en dos fracciones. Una, la fracción lábil que es más susceptible a su descomposición o mineralización, esto es, se hallan materiales de escasa permanencia en el suelo como los residuos de plantas y microorganismos en diferentes estadios de descomposición. Dos, la fracción recalcitrante y por lo mismo estable, en donde, hay participación mayoritaria de sustancias húmicas de lenta descomposición, como resultado de su alto peso molecular, de sus estructuras complejas, irregulares y de su interacción con los constituyentes minerales del suelo (Burbano, 2018). Una vez que el carbono entra en el suelo en forma de material orgánico gracias a los diferentes agentes como la fauna y flora, puede permanecer en ello durante décadas, siglos o incluso milenios.

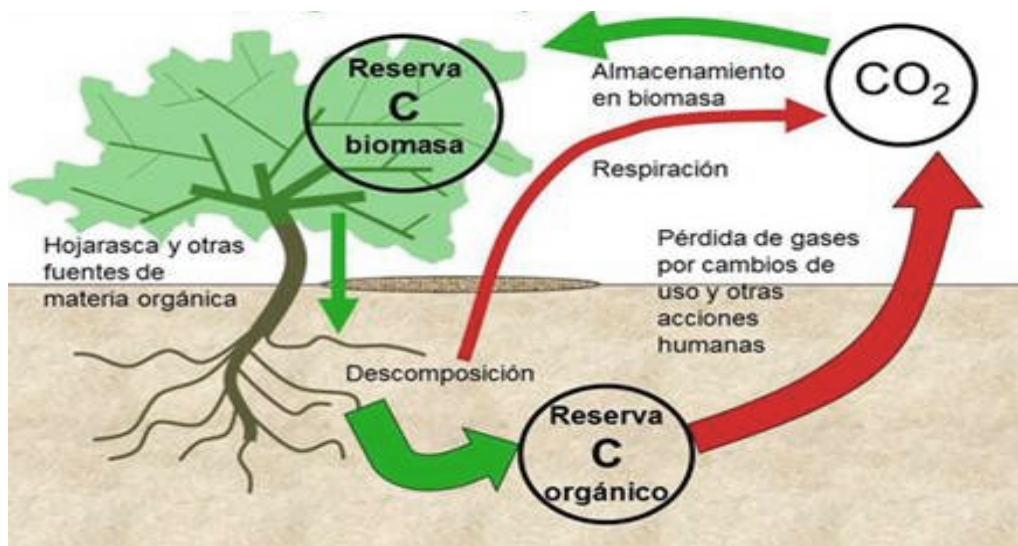


Figura 7. Almacenamiento de carbono orgánico en el suelo. Fuente: Asociación Correntina de Plantadores de Arroz, 2023.

Se estima que la reserva de COS almacena 1 500 Pg C en el primer metro de suelo a nivel mundial, lo cual, supone más carbono que el contenido en la atmósfera (aproximadamente 800 Pg C) y la vegetación terrestre (500 Pg C) combinados (FAO, 2015). El COS conforma cerca de los dos tercios del C fijado en los ecosistemas terrestres con un valor de 1, 500 Pg C. Por lo mencionado, el suelo funge como un gran almacén de carbono en este compartimento (Pardos, 2010; Caviglia *et al.*, 2016). Del total de COS, aproximadamente el 40% se encuentra en los ecosistemas forestales (Janzen, 2004), lo que representa un valor significativamente importante para el inventario global del carbono.

Estudios recientes demuestran que los suelos proveen de diversos servicios ambientales indispensables para asegurar la seguridad alimentaria, el mantenimiento de la biodiversidad y la regulación hidrológica, entre otros. Asimismo, los suelos constituyen la mayor fuente de carbono orgánico en los ecosistemas terrestres (FAO, 2017). En promedio el almacenamiento de carbono en áreas forestales en los bosques templados con suelo de tipo Luvisol en México es de 157 Mg C ha⁻¹ (Galicia *et al.*, 2016). El adecuado contenido de COS mejora la funcionalidad del sitio promoviendo el crecimiento y desarrollo adecuado de las plantas. También, con una cantidad óptima de COS incide en la capacidad de filtración de agua del suelo, así como, sumideros de carbono (Cotler *et al.*, 2016).

VII.9. Sistemas Agroforestales

Los sistemas agroforestales son modos de producción de la tierra en los que se combinan plantas leñosas perennes (como árboles, arbustos, palmas o bambús) con cultivos agrícolas o animales en la misma parcela de tierra con algún tipo de disposición espacial y cronológica (Figura 8) (FAO, 2020), desempeñando la función importante en la conservación de la biodiversidad, agua, restauración de áreas degradadas dentro de los paisajes deforestados y fragmentados, suministrando hábitats y recursos para la fauna, plantas y limita el desarrollo de las plagas y evitar la erosión del suelo (Somarriba, 1998; SADER, 2020).



Figura 8. Fotografía del sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas. Fuente: fotografía del autor

Estudios previos proponen que el manejo agroforestal está integrado a estrategias de manejo múltiple de la diversidad biológica y biocultural, y provee de beneficios ambientales a los seres humanos a escala local, regional y global. Entre estos beneficios destacan, la atenuación de los efectos de las heladas, la erosión del suelo, el aporte de sombra, protección, la provisión de hábitat, el mantenimiento o incremento de la fertilidad del suelo y la provisión de servicios hidrológicos (SEMARNAT, 2019).

Los SAF constituyen alternativas importantes para la mitigación y adaptación al cambio climático. Además, ha integrado el contexto biocultural. En ese sentido, la cultura guía las interacciones entre los seres humanos y su ambiente e incluye una cosmovisión y creencias particulares, conocimientos ancestrales, prácticas de manejo, y formas de organización social. En el país se tiene gran riqueza de pueblos originarios, que han

interactuado por miles de años con modificación y creación de los paisajes a partir de la selección, quema, siembra, trasplante (Moreno-Calles *et al.*, 2013).

Desde el enfoque de los sistemas agroforestales se identificó con varios sistemas agrícolas tradicionales que habían sido desconocidos previamente como sistemas agroforestales tradicionales, poniendo énfasis en el manejo de los elementos forestales de estos sistemas, así como en las interacciones y la importancia para el sistema en su conjunto.

Estos sistemas también desempeñan una función importante en la conservación de la diversidad biológica dentro de los paisajes deforestados y fragmentados, suministrando hábitats y recursos para las especies de animales y plantas; manteniendo la conexión del paisaje (facilitando el movimiento de animales, semillas y polen), reduciendo la frecuencia e intensidad de los incendios (CONAFOR, 2012).

VII.10. Producción de café bajo sistemas agroforestales

El café es de los productos básicos más valiosos en la agricultura mundial porque su cultivo, procesamiento, comercio, transporte y comercialización brindan empleo a millones de personas en todo el mundo y es vital para el desarrollo de la economía y la política de muchos países en desarrollo (SADER, 2020).

En México, gracias a la ubicación geográfica, es posible cultivar y producir diferentes variedades de café consideradas entre las mejores del mundo distribuidas en 15 estados de la república y 480 municipios sumando la superficie de 698 036.00 hectáreas en 2022 (SIAP, 2023). A nivel mundial, México ocupa el octavo lugar en la producción de café (OIC, 2014). En México, los principales estados productores de café son: Chiapas con 34.9%, Veracruz con 20.5% y Oaxaca aportan con 18.8%, respectivamente, en conjunto comprenden el 74.2% de la superficie nacional establecida con este cultivo (SIAP, 2023).

La producción mexicana de café cereza fue en promedio de 899 mil toneladas en el

periodo 2017-2021; Chiapas es el principal productor que aporta el 41% del volumen nacional, seguido por Veracruz 24% y Puebla 15.3% (SADER, 2020). En el estado de Chiapas las zonas de producción del café se encuentran en diferentes municipios de las regiones socioeconómicas de Valle Zoque, Mezcalapa, Frailesca, Soconusco, Norte, De los Bosques, Selva Lacandona y Altos de Chiapas. Esta última, comprende varios municipios, entre ellos, Chenalhó (ASERCA, 2017).

La producción del café en el área de estudio se caracteriza por producirse bajo sombra con diferentes especies de árboles como el género *Inga*, así como, *Quercus*, *Liquidambar*, *Pinus*, entre otros, que su mayoría son nativas y, por tanto, está asociada a la conservación del ambiente y al equilibrio ecológico. El establecimiento del cafetal comienza con la selección del sitio, tamaño y el arreglo topológico (distribución de plantas sobre el terreno), culminando en la plantación de las plántulas. Posteriormente, se realiza el manejo cultural de las mismas, como el chapeo (dos veces al año) que consiste en la corta de pastos y hierbas con machete a la altura de aproximadamente 10 cm sobre el suelo (Figura 9), dejando toda la materia orgánica en el sitio, además de la regulación de la sombra para el café una vez al año que consiste en podar las ramas de los árboles de *Inga edulis*, principalmente. Las ramas cortadas con diámetro mayor a 2.5 cm se emplean para combustible en los hogares, mientras que las hojas se dejan en el sitio, que posteriormente se degrada y se incorpora al suelo. El cafetal en el área de estudio cuenta con la edad de aproximadamente de 20 años, con renovaciones intermitentes a partir de los 15 años del establecimiento.



Figura 9. Actividades culturales en los sistemas agroforestales con café. Fuente: Fotografía del autor.

VIII. MATERIALES Y MÉTODOS

VIII.1. Ubicación y descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra en el municipio de Chenalhó, Chiapas, en la subprovincia fisiográfica de los Altos de Chiapas en las coordenadas geográficas $16^{\circ} 54' 18.7''$ de latitud norte y $92^{\circ} 37' 47.1''$ de longitud Oeste con altitud promedio de 1500 msnm (Figura 10), cuenta con la superficie de 10,000 m² (1 ha⁻¹), con vegetación aledaña predominante de bosque mesófilo de montaña. El clima es semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano, con precipitación media anual de 1500 mm y temperatura promedio anual de 18 °C (Figura 11). Tiene suelo de tipo Luvisol, que se caracteriza por presentar mayor contenido de arcilla en las capas de subsuelo que la superficial, son moderadamente profundos, con buena productividad, ligeramente ácidos (INEGI, 2007).

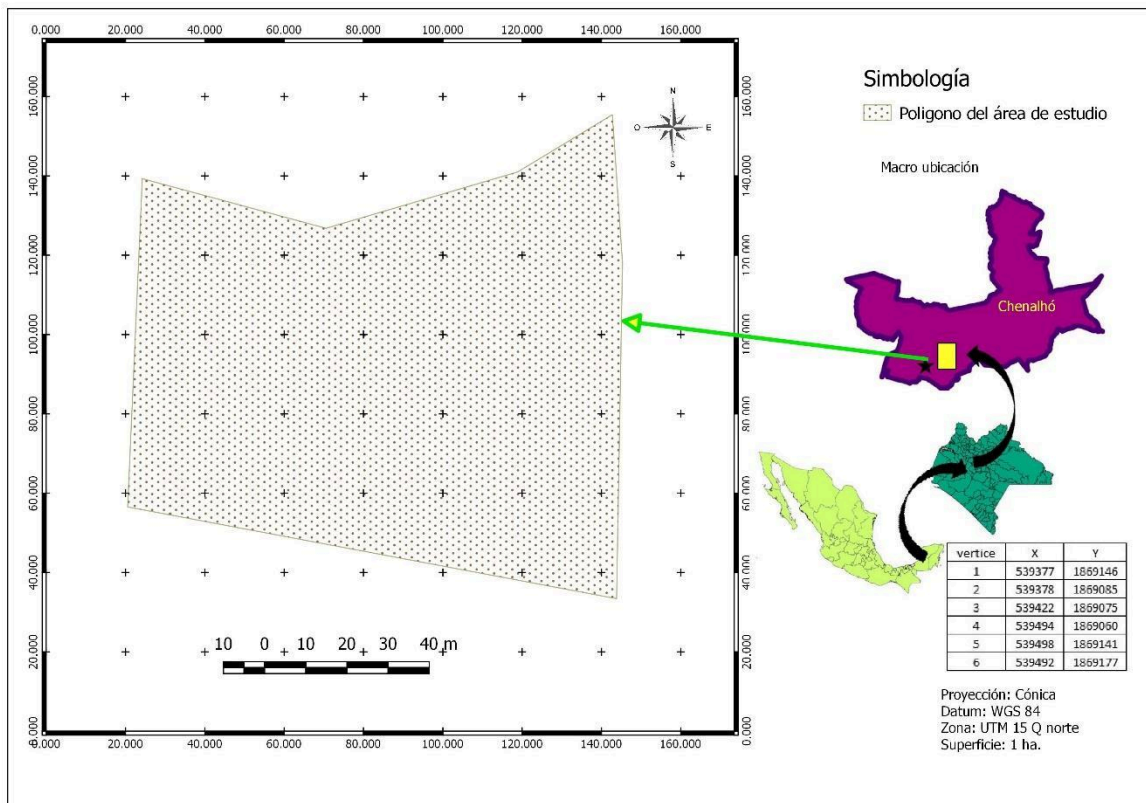


Figura 10. Ubicación del área de estudio, municipio de Chenalhó, Chiapas. Fuente: macro ubicación IDESMAC, 2016; plano: elaboración propia a través de Qgis 2.18.

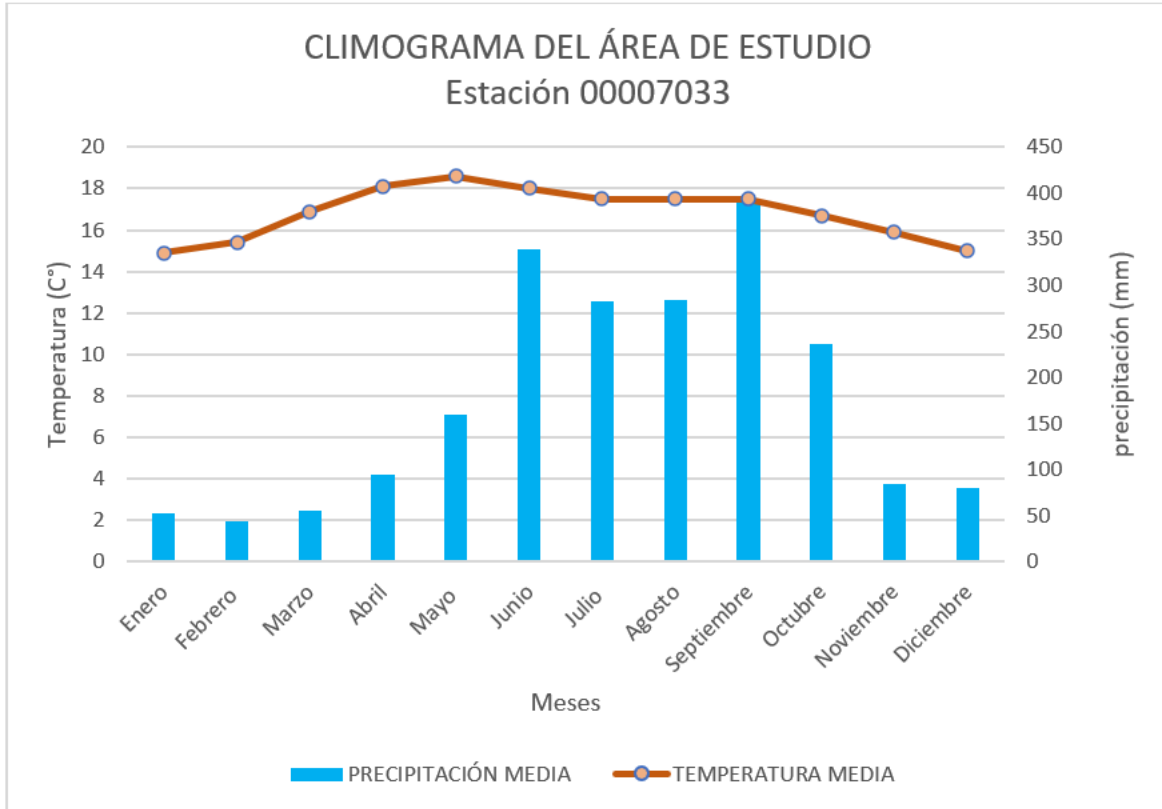


Figura 11. Climograma de la estación meteorológica 00007033, Chenalhó, Chiapas.

VIII.2. Esquema general del diseño de investigación

El procedimiento metodológico del presente trabajo de investigación contempla varias etapas (Figura 12), materiales y equipos como se muestra a continuación:

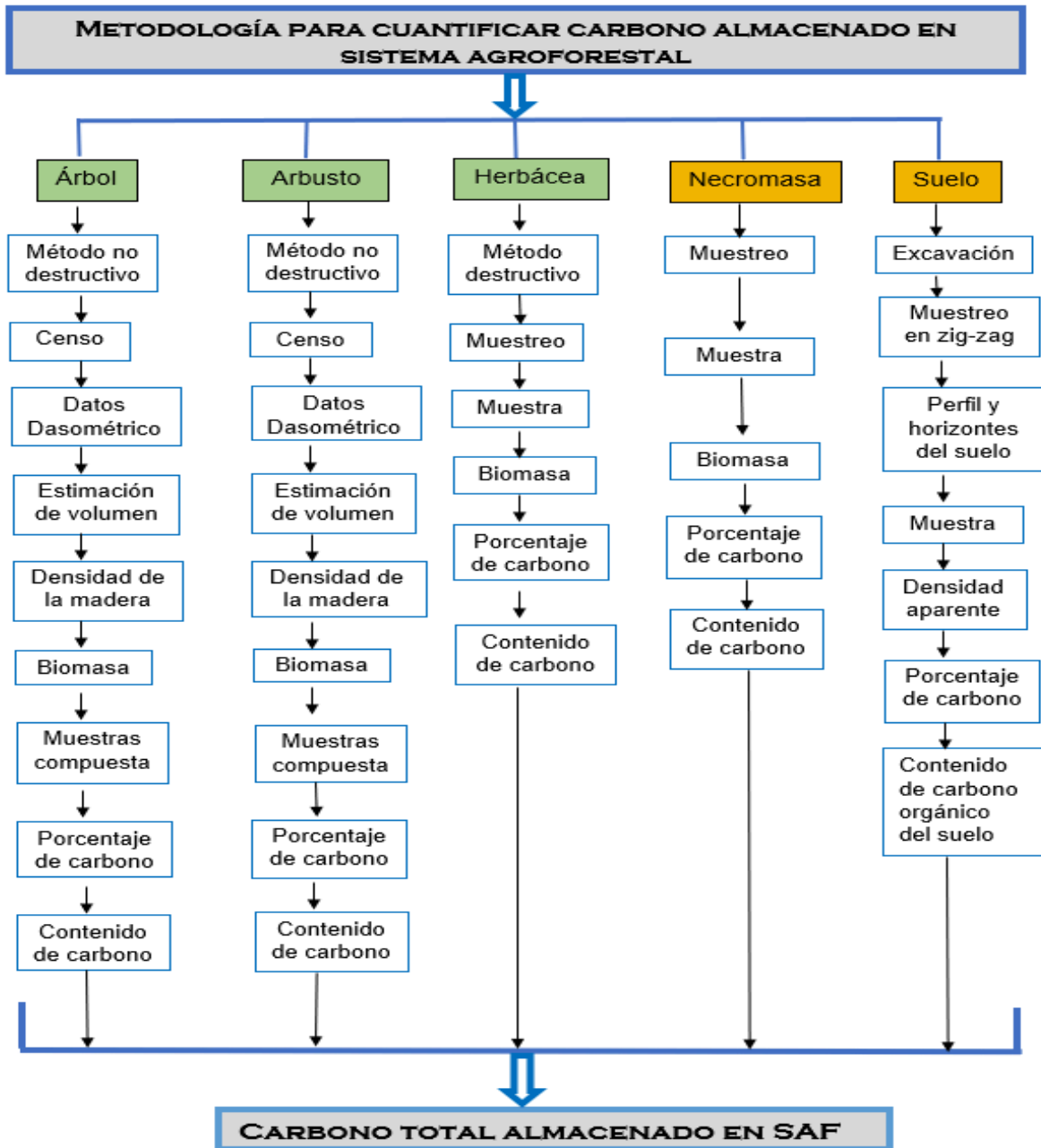


Figura 12. Esquema general de la metodología para la estimación de carbono almacenado en sistema agroforestal en Chenalhó, Chiapas. Fuente. Elaboración propia.

VIII.3. Recopilación de información en campo

Las estimaciones de biomasa aérea de árboles y arbustos se calcularon mediante el método no destructivo, que consiste, en usar ecuaciones utilizando los datos dasométricos obtenidos en campo, mediante las cuales es posible estimar la biomasa a través del volumen del árbol, en función de la densidad de la madera que cada especie presenta (Losada, 2017).

Medición del componente arbóreo

Se realizó la medición total de los árboles presentes en el sitio de estudio, es decir, se realizó el censo en el sitio de interés aplicando criterios de elección a los individuos como el diámetro normal mayor a 7.5 cm, dicha variable se midió con cinta diamétrica con precisión al milímetro marca Forestry Suppliers Inc®. y para la altura total del árbol se ocupó el clinómetro Suunto® (Figura 13). Posteriormente se recolectaron muestras de tallos, ramas y hojas (muestra compuesta) de cada especie presente en el sitio de aproximadamente medio kilogramo y fueron llevadas al laboratorio para su procesamiento y posterior análisis de concentración de carbono. A los árboles medidos se les tomó la muestra de madera (viruta) a la altura de 1.30 m con el taladro de pressler marca Haglöf Sweden® de 450 mm de longitud y 5.15 mm de diámetro. Mientras que las muestras de ramas y hojas se obtuvieron con tijeras y machete. Cada muestra se identificó hasta obtener el resultado de concentración de carbono.

Medición del componente arbustivo

Para las plantas arbustivas de café y otras especies, se utilizó el método no destructivo. De modo que se realizó un censo para cada especie arbustiva incluyendo las plantas de *Coffea arabica*, considerando individuos forestales en etapa de monte bravo y latizal con DN < 7.5 cm. A cada arbusto se le midió el diámetro a la base (0.15 metros sobre el suelo) con vernier marca Pretul®, altura total con flexómetro marca Pretul®, ambos con precisión al milímetro (Aquino-Ramírez *et al.*, 2018). Además, se recolectaron muestras de tallos, ramas y hojas de cada especie de aproximadamente medio kilogramo (Figura 14) para determinar la concentración de carbono. Posteriormente las muestras etiquetadas fueron trasladadas al laboratorio para su secado y análisis.



Figura 13. Obtención de datos dasométricos en árboles y arbustos en sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.



Figura 14. Obtención de muestras compuestas en árboles y arbustos en sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.

Medición del componente herbáceo

Para obtener la biomasa del componente herbáceo, se aplicó el método destructivo, que consistió en recolectar manualmente todo el material vegetal vivo dentro del área de 1X1 m (1 m²) (Figura 15), se tomó el peso húmedo y posteriormente se llevaron al laboratorio para su secado.

Medición del componente necromasa

La necromasa se refiere a todo el material vegetal muerto de árboles y arbustos acumulado sobre el suelo en diferentes fases de descomposición incluyendo los árboles muertos en pie (Harmon *et al.*, 1986), y juega un rol importante mediante el proceso de descomposición que vincula la biota que se desarrolla por encima y por debajo de la superficie del suelo (Bardgett y Wardle, 2010).

Para este estudio se recolectó toda la necromasa en el sitio de muestreo de 1x1m (1m²), que comprende la madera muerta que tiene un diámetro inferior a 2.5 cm, junto con las hojas, ramitas y frutos y/o semillas que caen de las plantas. se pesó para tener el peso húmedo y posteriormente se transportó al laboratorio para su secado. Cabe señalar que las ramas gruesas (mayor a 2.5 cm de diámetro) son recogidas por las personas para ser usadas como combustible en los hogares.



Figura 15. Obtención de muestras en el componente herbáceo y necromasa en sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.

Medición del componente suelo

Para las muestras del suelo se realizó el muestreo en zig-zag de 4 sitios por hectárea. El perfil de suelo se realizó a una profundidad de 1 m o hasta encontrar el horizonte C (Figura 16); registrando el grosor de cada horizonte y tomando una muestra de suelo en cada horizonte. Se pesó y se registró el peso húmedo en campo por muestra luego se llevaron al laboratorio para su secado, posteriormente se mezcló cada muestra del mismo horizonte obtenida en los sitios de muestreo hasta formar muestras homogéneas siguiendo la metodología de Espinoza-Domínguez (2012).



Figura 16. Obtención de muestras de suelo para determinar la concentración de carbono en sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.

VIII.4. Procesamiento de las muestras en la fase de laboratorio

Concentración de carbono

Las muestras de los árboles y arbustos recolectados en campo se colocaron en el horno de secado marca EELISA FE 133® que funciona con resistencias eléctricas y flujo de aire a temperatura de 65 °C por 72 horas o hasta alcanzar peso constante (Figura 17). Posteriormente se pulverizó cada muestra por separado de los componentes por árbol y arbusto con el molino triturador marca Thomas Wiley® modelo 3779-E10 hasta obtener el material en forma de harina. El producto se depositó en bolsas de plástico selladas, etiquetadas y se guardó en lugar seco, posteriormente se pesaron 15 mg en la balanza analítica marca Ohaus y la muestra se introdujo en el analizador elemental Thermo Scientific FLASH 2000 C-N Soils Analyzer para obtener la concentración de carbono por muestra de cada componente evaluado. El aparato ocupa muestras sólidas que mediante combustión completa a 900 °C y a través de los

gases que resultan de la combustión pasan por el detector infrarrojo no dispersivo que contabiliza las moléculas de carbono contenidas en la muestra (Figura 18).



Figura 17. Secado de muestras de diferentes componentes de árboles, arbustos, herbáceas en la estufa de secado a 65 °C hasta alcanzar peso constante.

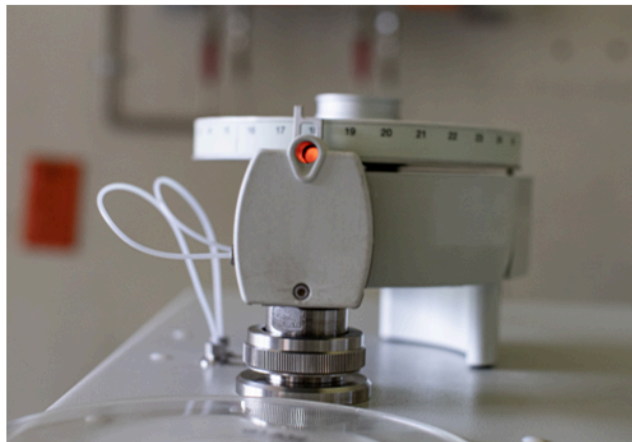
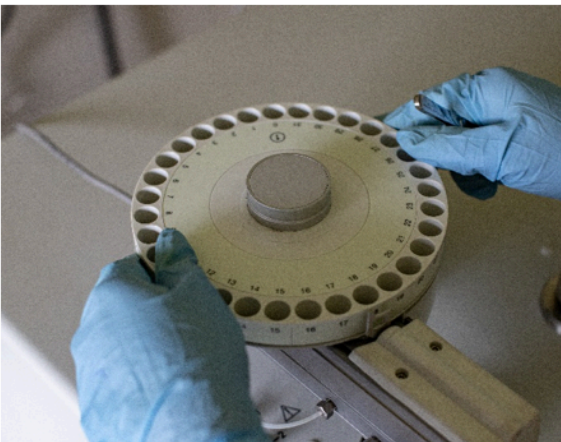
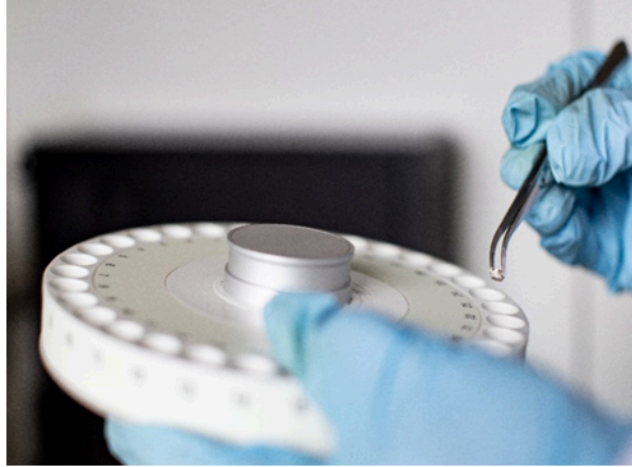


Figura 18. Introducción de muestras molidas y tamizadas de cada componente de árboles, arbustos, herbáceas, necromasa y suelo al analizador de carbono elemental Thermo Scientific FLASH 2000 C-N Soils Analyzer.

La muestra de suelo de cada horizonte se pulverizó manualmente con un mortero (Figura 19), hasta lograr una mezcla homogénea, luego se tamizó usando una malla de 10 mm para obtener densidad aparente y desechar impurezas, después se utilizó el tamiz de 100 mm para colocar la muestra en el analizador de carbono y determinar la concentración de carbono por horizonte.



Figura 19. Pulverización y tamizado de las muestras de suelo para introducir al analizador de carbono elemental Thermo Scientific FLASH 2000 C-N Soils Analyzer.

VIII.5. Estimar volumen y biomasa en los componentes

Volumen y biomasa en el componente arbóreo

El volumen del estrato arbóreo se obtuvo mediante ecuaciones matemáticas, se utilizaron las variables de diámetro normal y altura total de cada individuo. Para estimar el volumen se ocupó el modelo no lineal de Korsun (ecuación I). Posteriormente, se calculó la biomasa en kilogramos empleando el volumen individual y densidad de la madera de cada especie (ecuación II).

Ecuación para estimar volumen en especies arbóreas.

$$V=B0*(Dap+1) ^ (B1) * (At^B2)$$

Ecuación I

Donde:

V= volumen del árbol en metros cúbicos (m³).

Dap= diámetro a la altura del pecho (1.30 m) en metros (m).

At= altura total del árbol en metros (m).

B0= 0.005369.

B1= 6.838682.

B2= 1.114501.

Ecuación para la estimación de biomasa arbórea.

$$B= V*D$$

Ecuación II

Donde:

B= biomasa aérea total en kilogramos (kg).

V= volumen del árbol en m³.

D = densidad de la madera en kilogramos/metros cúbicos (kg/m³).

Volumen en el componente arbustivo

El volumen en el compartimento arbustivo se utilizó el diámetro basal a 0.15 metros y altura total de cada individuo y se empleó el modelo alométrico no lineal de Korsun (ecuación III). Posteriormente, se estimó la biomasa de cada individuo en kilogramos empleando el volumen individual y densidad de la madera de cada especie (ecuación IV).

$$V=B0*(Db+1) ^ (B1) * (At^B2)$$

Ecuación III

Donde:

V= volumen del arbusto en metros cúbicos (m³).

Db= diámetro basal a 0.15 m.

At= altura total del árbol en m.

B0= 0.9933.

B1= 0.003354.

B2= 0.883634.

Ecuación para la estimación de biomasa arbustivo.

Ecuación IV

$$B = V \cdot D$$

Donde:

B= biomasa aérea total en kilogramos (kg).

V= volumen de arbusto en m³.

D = densidad de la madera en kilogramos/metros cúbicos (kg/m³).

Densidad de madera en árboles y arbustos

La densidad de la madera es propia de cada especie vegetal (Martínez y Borja, 2005) y se refiere al cociente entre la masa del material seco, dividido por el volumen de la misma en estado verde a saturación de humedad (Williamson y Wiemann, 2010). Es decir, es la relación que existe entre la masa y el volumen de un cuerpo. La densidad de la madera son propiedades físicas y mecánicas que están estrechamente relacionadas al tipo de células contenidas que proporcionan la dureza y el peso de la madera (Rodríguez *et al.*, 2015). La clasificación de la densidad de la madera se encuentra desde muy liviano hasta muy pesado (Tabla 1). El conocimiento de la densidad de la madera permite realizar diversos estudios como la biomasa y la concentración de carbono en los vegetales (Ordoñez *et al.*, 2015).

Tabla 1. Clasificación de la densidad de la madera.

Característica	Densidad en kg m ⁻³
Muy liviano	300 – 500
Liviana	510 – 650
Semipesado	660 – 800
Pesada	810 – 950
Muy pesada	> 950

Fuente: Riesco *et al.*, 2019.

Para la realización de este apartado, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica para encontrar los valores de la densidad de la madera en cada especie tanto arbustiva como arbórea (Tabla 2). Lo cual, se encontró que la mayoría de las especies presentes en el área de estudio presentaron densidad de madera en la categoría liviana.

Tabla 2. Densidad de madera de especies arbóreas y arbustivas presentes en el sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.

Especie	Forma de vida	Densidad kg m ⁻³	Fuente
<i>Acnistus arborescens</i> (L.) Schltldl.	Árbol	503	Zelada, 2012.
<i>Annona cherimola</i> Mill.	Árbol	690	Cartuche, 2022.
<i>Casimiroa edulis</i> Llave	Árbol	616	Torres, 2020.
<i>Cedrela odorata</i> L.	Árbol	517	Sotomayor, 2018.
<i>Clethra suaveolens</i> Turcz.	Árbol	560	Ordoñez <i>et al.</i> , 2015.
<i>Croton draco</i> Schltldl. y Cham	Árbol	276	Sánchez-Rodríguez <i>et al.</i> , 2003.
<i>Cupressus lusitanica</i> Miller	Árbol	590	Ordoñez <i>et al.</i> , 2015.
<i>Eriobotrya japonica</i> (Thunb.) Lindl	Árbol	880	SITE, 2023.
<i>Eugenia copacabanensis</i> Kiaersk	Árbol	940	Leandro, 2009.
<i>Fraxinus uhdei</i> Wenz	Árbol	664	Sotomayor, 2015.
<i>Heliocarpus donnell-smithii</i> Rose	Árbol	130	Sotomayor, 2005.
<i>Inga edulis</i> Mart	Árbol	580	FAO, 1997.

<i>Liquidambar styraciflua</i> L.	Árbol	538	Vizcaíno-Bravo, 2017.
<i>Mangifera indica</i> L.	Árbol	680	Chave <i>et al.</i> , 2009.
<i>Morus alba</i> L.	Árbol	610	Ordoñez <i>et al.</i> , 2015.
<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R. Br.	Árbol	680	Cartuche, 2022.
<i>Nyssa sylvatica</i> Marshall.	Árbol	600	Sotomayor, 2015.
<i>Persea americana</i> Mill	Árbol	470	FAO, 1997.
<i>Pinus maximinoi</i> H.E. Moore	Árbol	415	Sotomayor <i>et al.</i> , 2003.
<i>Quercus crassifolia</i> Humb. & Bonpl.	Árbol	660	De la Paz y Dávalos, 2008.
<i>Quercus crispipilis</i> Trel.	Árbol	660	De la Paz y Dávalos, 2008.
<i>Siparuna guianensis</i> Aubl	Árbol	590	Ordoñez <i>et al.</i> , 2015.
<i>Syzygium jambos</i> (L.) Alston	Árbol	850	Cartuche, 2022.
<i>Toxicodendron striatum</i> (Ruiz & Pav.) Kuntze	Árbol	600	Ordoñez <i>et al.</i> , 2015.
<i>Buddleja cordata</i> H.B.K.	Arbusto	340	Romero-Rangel <i>et al.</i> , 2003.
<i>Citrus aurantiifolia</i> (Christm.) Swingle	Arbusto	780	Brenes-Angulo <i>et al.</i> , 2012.
<i>Citrus limettioides</i> Tanaka	Arbusto	440	Brenes-Angulo <i>et al.</i> , 2012.
<i>Coffea arabica</i> L.	Arbusto	620	SITE, 2023.
<i>Lippia myriocephala</i> Schlttdl. & Cham.	Arbusto	405	Vizcaíno-Bravo, 2017.

Biomasa en el componente herbáceo y necromasa

La determinación de biomasa en herbáceas y necromasa fue directa mediante la recolección completa del material en el sitio de 1x1 m. Se pesó cada componente en campo por separado (peso verde en gramos), se introdujo a la estufa para secarlos hasta tener peso constante, el valor obtenido del peso seco es el valor directo de la biomasa de cada componente.

VIII.6. Cuantificación de carbono en los componentes

Carbono aéreo en árboles, arbustos, herbácea y necromasa

El contenido de carbono existente en los árboles y arbustos se estimó mediante el uso de la ecuación (ecuación V). Con base a las variables biomasa y concentración de

carbono, se determinó el contenido de carbono total en cada componente de árboles, arbustos, herbácea y necromasa evaluado (Razo *et al.*, 2013).

Ecuación para el cálculo de carbono total en los estratos arbóreo y arbustivo:

$$Ct=B*CC$$

Ecuación V

Donde:

Ct= carbono total en mega gramos (Mg C ha⁻¹).

B= biomasa en kg.

CC= concentración de carbono en %.

Carbono orgánico en el suelo

El suelo es un importante espacio para el almacenamiento de carbono (FAO, 2017) y para la determinación del carbono orgánico en suelos (COS) se obtuvo aplicando la metodología propuesta por González *et al.* (2008) y FAO (2017) a través de la combustión seca, en donde, se considera variables como contenido de carbono orgánico, la densidad aparente, el peso y la superficie, tal como se menciona en la siguiente ecuación:

Ecuación para el cálculo carbono orgánico del suelo:

$$COS= CO*Da* Ps*Sup$$

Ecuación VI

Donde:

COS = carbono orgánico del suelo en Mg C ha⁻¹.

CO = carbono orgánico total en %.

Da = densidad aparente en g cm⁻³

Ps = profundidad del suelo en m.

Sup = superficie en m².

VIII.7. Densidad aparente del suelo

La densidad aparente del suelo es la relación entre la masa o peso del suelo seco y el volumen total de la misma, incluyendo al espacio poroso (Flores y Alcalá, 2010). Y se determina mediante la siguiente fórmula:

$$DA = P_{ss} / V_{ts}$$

Ecuación VII

Donde:

DA= densidad aparente en $g\ cm^{-3}$.

P_{ss}= peso del suelo seco en g.

V_{ts}= volumen total del suelo en cm^3 .

En el presente trabajo, la densidad aparente de suelo se determinó mediante el método de Probeta, que consiste en pulverizar el suelo y pasar por un tamiz con aberturas de 2 mm de diámetro (malla 10) compuesto de acero inoxidable. Posteriormente, se pesó una cantidad del suelo cribado en una balanza, y se colocó en una probeta graduada, se tapó y golpeó varias veces sobre una superficie firme hasta tener la muestra homogénea, después de un tiempo se midió la cantidad de suelo que descendió del nivel original, que corresponde al nuevo volumen y se obtuvieron los valores por cada horizonte de suelo.

VIII.8. Análisis estadístico

Los datos obtenidos de contenido de carbono por componente en los diferentes estratos se sometieron a análisis de varianza tradicional (ANOVA) con un nivel de significancia de $P \leq 0.05$. Los análisis que presentaron diferencias estadísticas se les aplicó la prueba de comparación de medias Tukey ($P \leq 0.05$), para identificar los componentes evaluados que expresan diferencias estadísticamente significativas en el almacenamiento de carbono.

IX. RESULTADOS

IX.1. Especies presentes en el componente arbóreo y arbustivo

El área de interés está destinada para la producción de café con el enfoque de sistemas agroforestales tradicionales. En el censo realizado en el área se encontraron 29 especies de 22 familias (Tabla 3), de los cuales, 24 especies corresponden a árboles y 5 son arbustos. En cuanto a los árboles, la especie de *Inga edulis*, fue la más frecuente, seguido de *Liquidambar styraciflua*, y *Cupressus lusitanica* con 114, 24 y 9 individuos, respectivamente (Tabla 4). En el estrato arbustivo, las especies dominantes fueron *Coffea arabica*, seguido del *Citrus aurantifolia* y *Citrus limettioides* con 1582, 7 y 6 individuos, respectivamente. Siendo un total de 1814 individuos en el predio de una hectárea.

En el estrato arbóreo, las especies con mayor altura fueron el *Cupressus lusitanica* y *Liquidambar styraciflua*, con promedios de 15 y 20 metros, respectivamente. En tanto, la dominancia en el estrato arbustivo fue *Coffea arabica*, y se debe a que es la especie agrícola de interés y por el recurso económico que genera por la cosecha del café.

Tabla 3. Abundancia de especies arbóreas y arbustivas presentes en el sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.

Familia	Especie	Nombre Común	Abundancia	Forma de vida
Solanaceae	<i>Acnistus arborescens</i> (L.) Schltl.	Guitité	1	Árbol
Annonaceae	<i>Annona cherimola</i> Mill.	Chirimoya	4	Árbol
Rutaceae	<i>Casimiroa edulis</i> Llave	Zapote blanco	2	Árbol
Meliaceae	<i>Cedrela odorata</i> L.	Cedro rojo	2	Árbol
Clethraceae	<i>Clethra suaveolens</i> Turcz.	Cucharillo	1	Árbol
Euphorbiaceae	<i>Croton draco</i> Schltl. y Cham	Sangre de draco	4	Árbol
Cupressaceae	<i>Cupressus lusitanica</i> Miller	Ciprés	9	Árbol
Rosaceae	<i>Eriobotrya japonica</i> (Thunb.) Lindl	Níspero	7	Árbol
Myrtaceae	<i>Eugenia copacabanensis</i> Kiaersk	Eugenia	4	Árbol
Oleaceae	<i>Fraxinus uhdei</i> Wenz	Fresno	5	Árbol
Malvaceae	<i>Heliocarpus donnell-smithii</i> Rose	Corcho	3	Árbol
Fabaceae	<i>Inga edulis</i> Mart.	Chalum	114	Árbol
Altingiaceae	<i>Liquidambar styraciflua</i> L.	Liquidambar	24	Árbol
Anacardiaceae	<i>Mangifera indica</i> L.	Mango	3	Árbol
Moraceae	<i>Morus alba</i> L.	Morera blanca	1	Árbol
Myrinaceae	<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R. Br.	Espadero	3	Árbol
Nissaceae	<i>Nyssa sylvatica</i> Marshall.	Manzanillo	7	Árbol
Lauraceae	<i>Persea americana</i> Mill	Aguacate	1	Árbol
Pinaceae	<i>Pinus maximinoi</i> H.E. Moore	Ocote	2	Árbol
Fagaceae	<i>Quercus crassifolia</i> Humb. & Bonpl.	Roble	7	Árbol
Fabaceae	<i>Quercus crispipilis</i> Trel.	Encino	5	Árbol
Monimiaceae	<i>Siparuna guianensis</i> Aubl	Hierba de pasmo	1	Árbol
Myrtaceae	<i>Syzygium jambos</i> (L.) Alston	Pomarrosa	1	Árbol
Anacardiaceae	<i>Toxidendron striatum</i> (Ruiz & Pav.) Kuntze.	Mala mujer	2	Árbol
Scrophulariaceae	<i>Buddleja cordata</i> H.B.K.	Tepozan	4	Arbusto
Rutaceae	<i>Citrus aurantifolia</i> (Christm.) Swingle	Lima agria	7	Arbusto
Rutaceae	<i>Citrus limettioides</i> Tanaka	Lima dulce	6	Arbusto
Rubiaceae	<i>Coffea arabica</i> L.	Café	1582	Arbusto
Verbenaceae	<i>Lippia myriocephala</i> Schltl. & Cham.	Mususte	2	Arbusto
Total			1814	

Tabla 4. Especies arbóreas y arbustivas con mayor dominancia en sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.

Familia	Especie	Nombre común	Abundancia	Forma de vida
Fabaceae	<i>Inga edulis</i> Mart.	Chalum	114	Árbol
Altingiaceae	<i>Liquidambar styraciflua</i> L.	Liquidambar	24	Árbol
Rubiaceae	<i>Coffea arabica</i> L.	Café	1582	Arbusto

IX.2. Estimación de volumen en el componente arbóreo

Para estimar el volumen fustal total de cada individuo de los árboles se usó el modelo no lineal Korsun con el coeficiente de determinación de $R^2=0.99$ (Tabla 5 y Figura 20). Para ello, se emplea el diámetro normal, la altura total del árbol y tres parámetros. Las especies que presentaron valores altos en volumen fueron *C. lusitanica*, *L. styraciflua*, e *I. edulis*, con 12.56, 55.21 y 61.33 m³, respectivamente. El volumen total obtenido de los árboles fue de 167.26 m³ (Tabla 6).

Tabla 5. Parámetros estimadores del modelo alométrico de Korsun para estimar volúmenes de los árboles.

Procedimiento Modelo Korsun							
No lineal OLS Resumen de errores residuales							
Ecuación	Modelo DF	Error DF	SSE	MSE	Raíz MSE	R-cuadrado	R-Sq adj
V	3	205	1.3057	0.00637	0.0798	0.9888	0.9886

No lineal OLS Parámetro Estimadores				
Parámetro	Estimador	Err std aprox	Valor t	Aprox Pr > t
B0	0.005369	0.000327	16.42	<.0001
B1	6.838682	0.0615	111.25	<.0001
B2	1.114501	0.0186	59.91	<.0001
Modelo $V=B0*(Dap+1)^{(B1)} * (At^{B2})$				
$V= 0.005369*(Dap+1)^{(6.838682)} * (At^{1.114501})$				

Número de observaciones		Estadísticos para el sistema	
Usado	208	Objetivo	0.006278
Ausente	0	Objetivo*N	1.3057

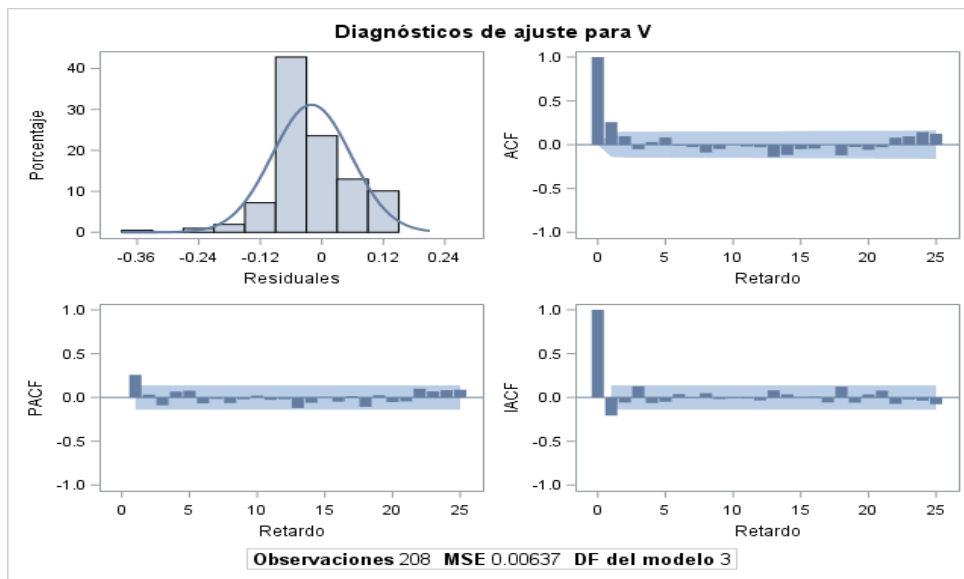
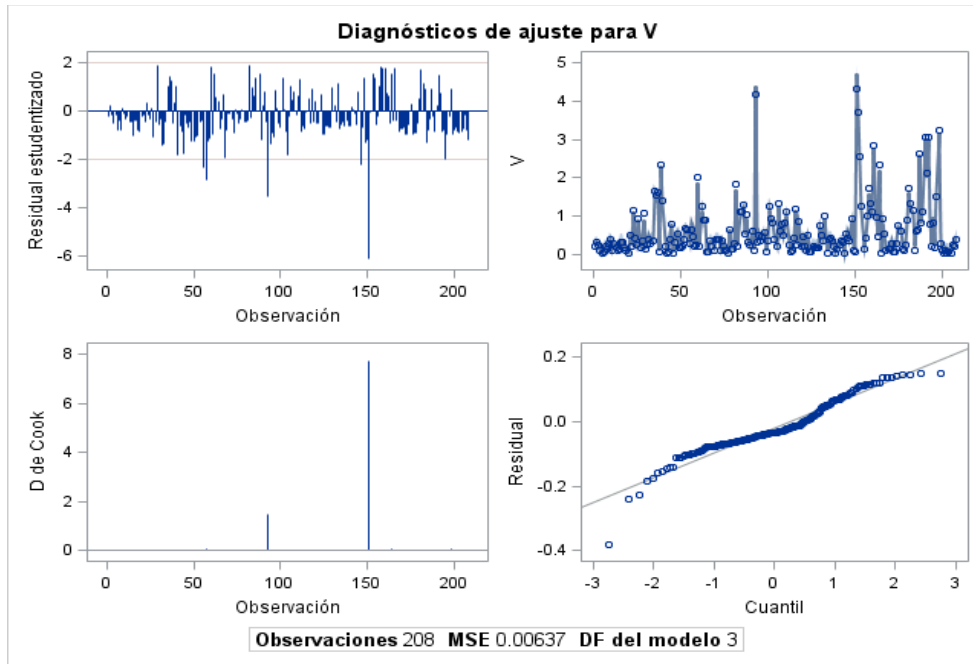


Figura 20. Relación de los datos de volumen observada en árboles mediante el modelo Korsun.

Tabla 6. Volumen y biomasa total aérea en árboles del sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.

Especie	Volumen por especie m³	Biomasa kg
<i>Acnistus arborescens</i> (L.) Schltld.	0.56	283.52
<i>Annona cherimola</i> Mill.	1.25	859.37
<i>Casimiroa edulis</i> Llave	0.75	460.63
<i>Cedrela odorata</i> L.	1.59	820.22
<i>Clethra suaveolens</i> Turcz.	0.71	399.51
<i>Croton draco</i> Schltld. y Cham	1.17	322.21
<i>Cupressus lusitanica</i> Miller	12.56	7411.98
<i>Eriobotrya japonica</i> (Thunb.) Lindl	1.13	990.58
<i>Eugenia copacabanensis</i> Kiaersk	0.88	830.18
<i>Fraxinus uhdei</i> Wenz	2.32	1540.57
<i>Heliocarpus donnell-smithii</i> Rose	7.26	943.67
<i>Inga edulis</i> Mart.	61.33	35573.01
<i>Liquidambar styraciflua</i> L.	55.21	28044.57
<i>Mangifera indica</i> L.	3.07	2090.92
<i>Morus alba</i> L.	0.71	435.18
<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R. Br.	1.32	900.67
<i>Nyssa sylvatica</i> Marshall.	1.85	1107.62
<i>Persea americana</i> Mill	0.51	240.58
<i>Pinus maximinoi</i> H.E. Moore	3.68	1526.60
<i>Quercus crassifolia</i> Humb. & Bonpl.	2.25	1486.74
<i>Quercus crispipilis</i> Trel.	6.28	4141.87
<i>Siparuna guianensis</i> Aubl	0.27	157.84
<i>Syzygium jambos</i> (L.) Alston	0.29	243.57
<i>Toxidendron striatum</i> (Ruiz & Pav.) Kuntze.	0.31	188.51
Total	167.26	91000.12

IX.3. Determinación de biomasa en los componentes

Biomasa en el componente arbóreo

La estimación de la biomasa aérea en árboles se aplicó la ecuación II, en ello, se emplearon las variables de volumen y densidad de la madera, lo cual, las especies de *Pinus maximinoi*, *Cupressus lusitanica*, *Quercus crispipilis*, y *Liquidambar styraciflua*, fueron los que presentaron mayores valores (Figura 21) con 763.30, 823.55, 828.37 y 1,168.52 kg, respectivamente. Siendo un total de 91000.12 kg ha⁻¹ que equivale a 91.00 Mg ha⁻¹ de biomasa por hectárea en el área de estudio.

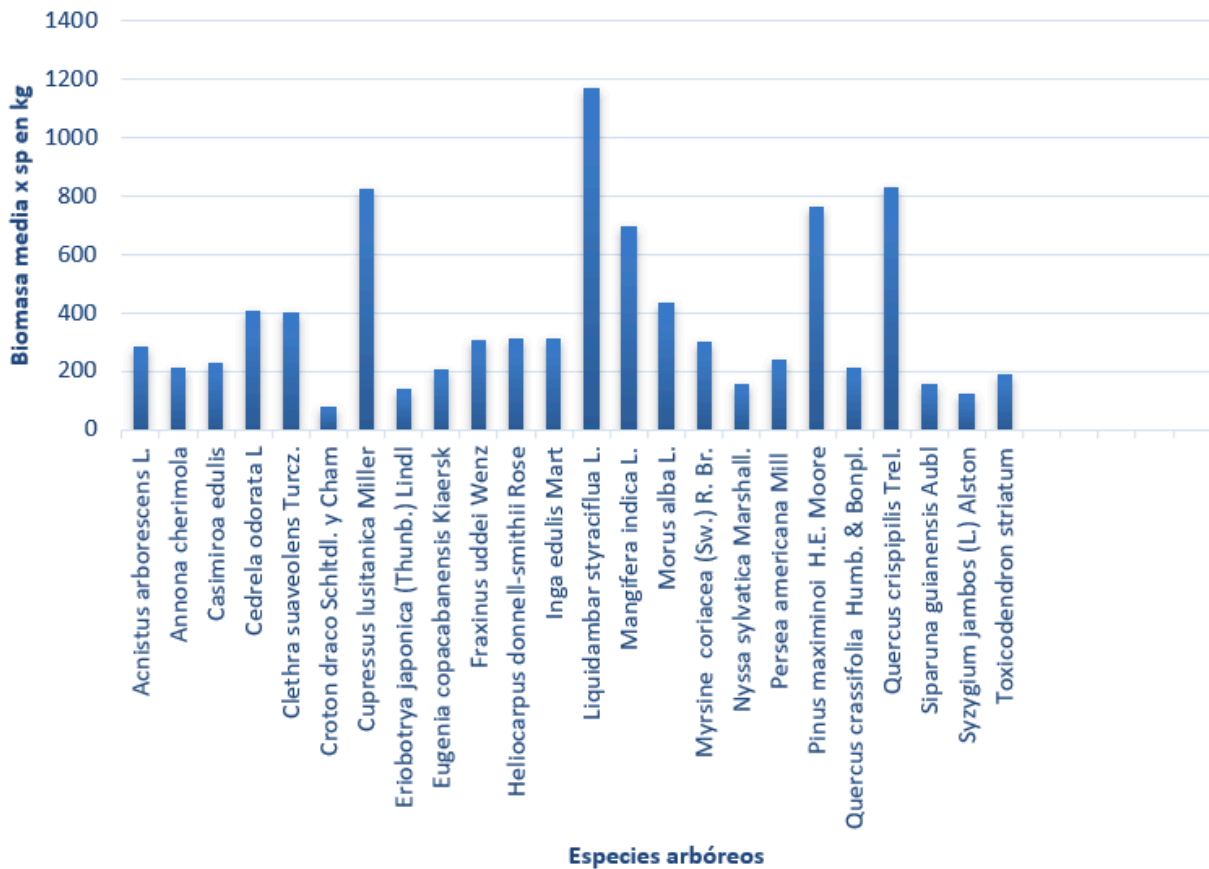


Figura 21. Especies con mayor biomasa aérea del componente arbóreo en el sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.

Biomasa en el componente arbustivo

La estimación de volumen aéreo en arbustos, se realizó mediante el modelo no lineal Korsun con un coeficiente de determinación de $R^2=0.99$ (Tabla 7 y Figura 22). Para obtener la biomasa se multiplicó el volumen por densidad de la madera y los resultados muestran que las especies de *Buddleja cordata*, *Citrus aurantiifolia* y *Coffea arabica* fueron los que presentaron mayores cantidades de biomasa (Tabla 8) con 16.11, 19.82 y 3548.07 kg, respectivamente, siendo un total de 3,600.07 kg que equivale a 3.60 Mg de biomasa por hectárea. El café además de otorgar beneficio económico también aporta el beneficio ecológico al almacenar grandes cantidades de biomasa en el sistema agroforestal.

Tabla 7. Variables utilizadas para el procedimiento de comparación de correlación con el modelo Korsun para estimar volumen en los arbustos.

Procedimiento Modelo Korsun							
No lineal OLS Resumen de errores residuales							
Ecuación	Modelo DF	Error DF	SSE	MSE	Raíz MSE	R-cuadrado	R-Sq adj
B	3	1624	0.5694	0.000351	0.0187	0.9997	0.9997

No lineal OLS Parámetro Estimadores				
Parámetro	Estimador	Err std aprox	Valor t	Aprox Pr > t
B0	0.9933	0.000761	1305.84	<.0001
B1	0.003354	0.000382	8.79	<.0001
B2	0.883634	0.000434	2036.52	<.0001

Modelo $B=B0*(Db+1) ^ (B1) * (At^{B2})$
 $B= 0.9933*(Db+1) ^ (0.003354) * (At^{0.883634})$

Número de observaciones		Estadísticos para el sistema	
Usado	1627	Objetivo	0.000350
Ausente	4	Objetivo*N	0.5694

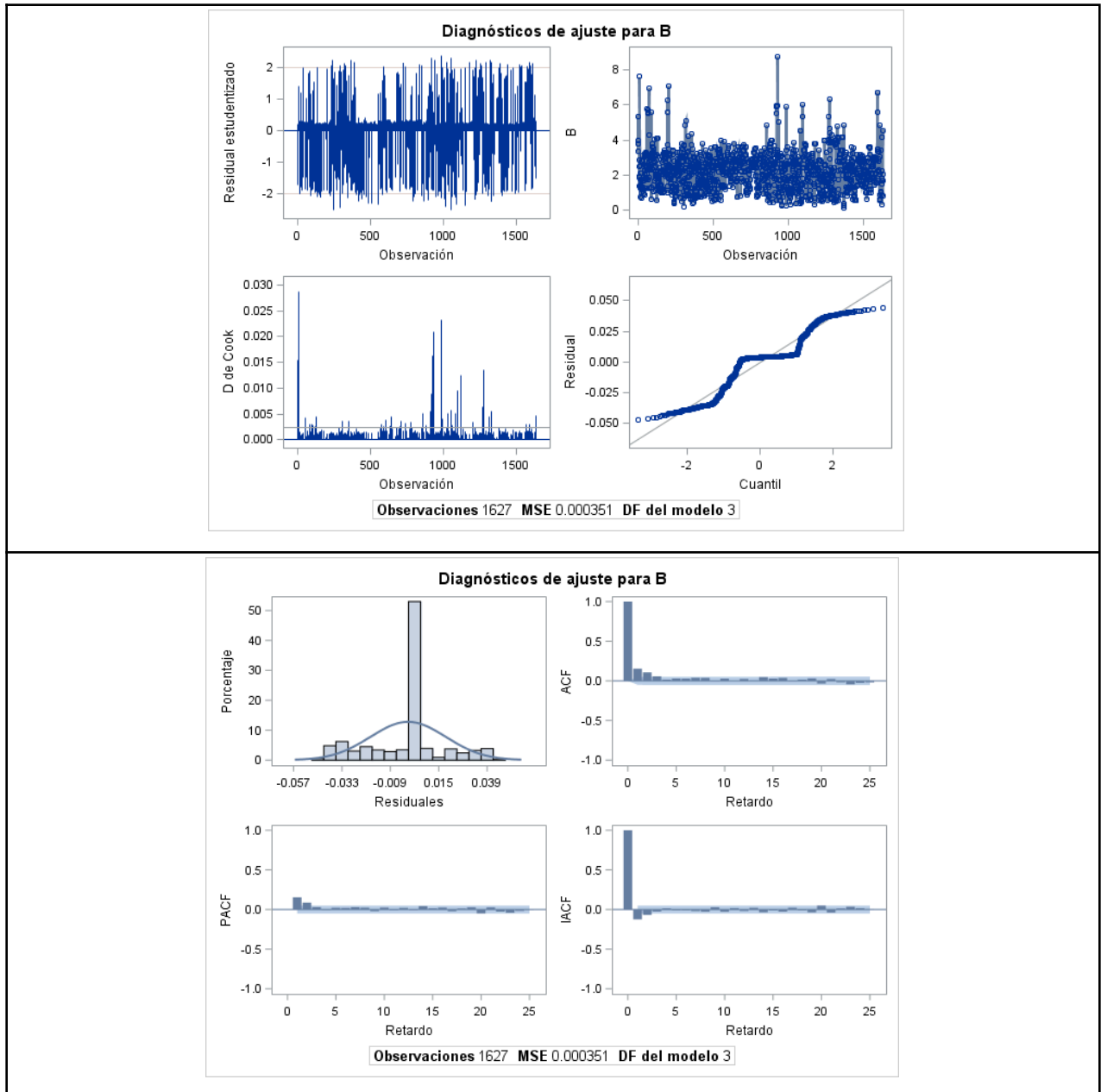


Figura 22. Relación de los datos de volumen observado en arbustos mediante el modelo Korsun.

Tabla 8. Biomasa aérea del componente arbustivo en el sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.

Especie	Biomasa aéreo arbustivo en kg
<i>Buddleja cordata</i> H.B.K.	16.11
<i>Citrus aurantifolia</i> (Christm.) Swingle	19.82
<i>Citrus limettioides</i> Tanaka	9.68
<i>Coffea arabica</i> L.	3548.07
<i>Lippia myriocephala</i> Schlttdl. & Cham.	6.81
Total	3600.49

Biomasa en el componente herbáceo y necromasa

La biomasa acumulada en el estrato herbáceo fue en promedio de 4.24 Kg mientras que en necromasa fue de 4.56 kg de biomasa (Tabla 9). La cantidad de biomasa total en el estrato herbáceo y necromasa fue de 10,600 y 11,325 kg ha⁻¹, que equivale 10.600 y 11.325 Mg ha⁻¹, respectivamente.

Tabla 9. Biomasa en el compartimento herbáceo y necromasa en el sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.

Biomasa en kilogramos		
Sitio	herbácea	Necromasa
1	1.29	2.76
2	1.34	0.91
3	0.80	0.19
4	0.82	0.67
Promedio	1.0625	1.1325
Total en ha⁻¹	10,625.00	11,325.00

IX.4. Concentración de carbono en los componentes

Concentración de carbono en árboles

La concentración de carbono en las especies arbóreas nativas en el componente aéreo fueron el *P. maximinoi* con 49.02%, *M. coriacea* con 50.91% y *Q. crispipilis* con 52.56%, respectivamente (Tabla 10).

Tabla 10. Concentración de carbono en especies arbóreas del sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.

Especie	Concentración de carbono %
<i>Acnistus arborescens</i> (L.) Schlttdl.	44.69
<i>Annona cherimola</i> Mill.	47.41
<i>Casimiroa edulis</i> Llave	44.90
<i>Cedrela odorata</i> L.	46.80
<i>Clethra suaveolens</i> Turcz.	47.11
<i>Croton draco</i> Schlttdl. y Cham	44.76
<i>Cupressus lusitanica</i> Miller	48.88
<i>Eriobotrya japonica</i> (Thunb.) Lindl	46.22
<i>Eugenia copacabanensis</i> Kiaersk	46.08
<i>Fraxinus uhdei</i> Wenz	46.69
<i>Heliocarpus donnell-smithii</i> Rose	44.86
<i>Inga edulis</i> Mart	48.97
<i>Liquidambar styraciflua</i> L.	48.71
<i>Mangifera indica</i> L.	44.56
<i>Morus alba</i> L.	43.79
<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R. Br.	50.91
<i>Nyssa sylvatica</i> Marshall.	45.78
<i>Persea americana</i> Mill	47.71
<i>Pinus maximinoi</i> H.E. Moore	49.02
<i>Quercus crassifolia</i> Humb. & Bonpl.	43.03
<i>Quercus crispipilis</i> Trel.	52.56
<i>Siparuna guianensis</i> Aubl	46.36
<i>Syzygium jambos</i> (L.) Alston	47.86
<i>Toxidendron striatum</i> (Ruiz & Pav.) Kuntze.	48.41

Concentración de carbono en arbustos

La concentración de carbono en especies arbustivas presentes en el área de estudio, fue de 44.96% en *B. cordata*, seguido de *C. arabica* con 47.73% y *C. limettioides* con 48.31%, respectivamente (Tabla 11).

Tabla 11. Concentración de carbono en especies arbustivas del sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.

Especie	Concentración de carbono en %
<i>Coffea arabica</i> L.	47.73
<i>Citrus aurantifolia</i> (Christm.) Swingle	42.66
<i>Citrus limettioides</i> Tanaka	48.31
<i>Lippia myriocephala</i> Schltld. & Cham.	43.89
<i>Buddleja cordata</i> H.B.K.	44.96

Concentración de carbono en herbáceo y necromasa

La concentración de carbono en herbáceas y necromasa fue de 44.12 y 46.75% respectivamente (Tabla 12). La materia orgánica muerta sobre el piso conocida como necromasa contiene mayor concentración de carbono en comparación a las plantas herbáceas.

Tabla 12. Concentración de carbono en plantas herbáceas y necromasa del sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.

Componente	Concentración de carbono en %
Herbáceo	44.12
Necromasa	46.75

Concentración de carbono en suelo

El contenido de carbono orgánico (COS) en el suelo fue mayor en el horizonte A con 5.90% (Tabla 13), seguido del horizonte E con 2.02% y el horizonte B con 1.54%. El aporte de la materia orgánica por cada horizonte al suelo juega un rol importante en la concentración de COS, aunado a la densidad aparente y la profundidad de la misma.

Tabla 13. Contenido del carbono orgánico en diferentes horizontes del suelo del sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.

Capa del suelo	Contenido de carbono orgánico (%)	Densidad aparente (g/cm ³)	Profundidad (cm)
Horizonte A	5.90	1.0812	18.25
Horizonte E	2.02	1.2299	25.75
Horizonte B	1.54	1.1690	33.50
Horizonte C	1.16	1.1600	20.25

IX.5. Densidad aparente del suelo

La densidad aparente del suelo se determinó por horizonte mediante el método de la probeta. Dichos valores son parte importante en el proceso para cuantificar el contenido de carbono orgánico en cada capa del suelo. Los resultados se muestran en la tabla 13.

IX.6. Almacenamiento de carbono en los componentes

Contenido de carbono en árboles

Con los valores de biomasa y concentración de carbono obtenidos por especie de árbol, se procedió a calcular la cantidad de carbono almacenado en cada individuo por especie. Hubo especies que almacenan desde 0.073 mega gramos de carbono por hectárea (Mg C ha^{-1}) hasta 17.420 Mg C ha^{-1} . A nivel de especie los que presentaron mayor almacenamiento de carbono fueron *C. lusitanica* (Tabla 14), *L. styraciflua.*, e *I. edulis* con 3.6, 13.6 y 17.4 Mg C ha^{-1} , respectivamente. En el sistema agroforestal con café el almacenamiento de carbono aéreo total en árboles fue de 44.19 Mg C ha^{-1} .

Tabla 14. Almacenamiento de carbono aéreo en árboles del sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.

Especie	Carbono total por especie en kg C ha⁻¹	Carbono total por especie en Mg C ha⁻¹
<i>Acnistus arborescens</i> (L.) Schltld.	126.70	0.13
<i>Annona cherimola</i> L.	407.40	0.41
<i>Casimiroa edulis</i> L.	206.80	0.21
<i>Cedrela odorata</i> L.	383.90	0.38
<i>Clethra suaveolens</i> Turcz.	188.20	0.19
<i>Croton draco</i> Schltld. y Cham	144.20	0.14
<i>Cupressus lusitanica</i> Miller	3623.00	3.62
<i>Eriobotrya japonica</i> (Thunb.) Lindl	457.80	0.46
<i>Eugenia copacabanensis</i> Kiaersk	382.50	0.38
<i>Fraxinus uhdei</i> Wenz	719.30	0.72
<i>Heliocarpus donnell-smithii</i> Rose	423.30	0.42
<i>Inga edulis</i> Mart	17420.10	17.42
<i>Liquidambar styraciflua</i> L.	13660.50	13.66
<i>Mangifera indica</i> L.	931.70	0.93
<i>Morus alba</i> L.	190.60	0.19
<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R. Br.	458.50	0.46
<i>Nyssa sylvatica</i> Marshall.	507.10	0.51
<i>Persea americana</i> Mill.	114.80	0.12
<i>Pinus maximinoi</i> H.E. Moore	748.30	0.75
<i>Quercus crassifolia</i> Humb. & Bonpl.	639.70	0.64
<i>Quercus crispipilis</i> Trel.	2177.00	2.18
<i>Siparuna guianensis</i> Aubl.	73.20	0.07
<i>Syzygium jambos</i> (L.) Alston.	116.60	0.12
<i>Toxidendron striatum</i> (Ruiz & Pav.) Kuntze.	91.30	0.09
Total	44,190.00	44.19

Contenido de carbono en arbustos

El contenido de carbono en este compartimento bajo el sistema agroforestal con café, se encontró que las especies *B. cordata*, *C. aurantifolia* y *C. arabica* (Tabla 15), presentaron mayores almacenamientos de carbono con 0.007, 0.008 y 1.69 Mg C ha⁻¹, respectivamente. Siendo el café con mayor capacidad de almacenar carbono en su biomasa. Esto se debe por la gran dominancia de esta especie en el sitio ya que aporta más recursos económicos. El carbono total almacenado en este compartimento fue de 1.72 Mg C ha⁻¹.

Tabla 15. Almacenamiento de carbono aéreo en arbustos del sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.

Especie	Carbono total por especie en kg C ha ⁻¹	Carbono total por especie Mg C ha ⁻¹
<i>Buddleja cordata</i> H.B.K.	7.24	0.007
<i>Citrus aurantifolia</i> (Christm.) Swingle	8.46	0.008
<i>Citrus limettioides</i> Tanaka	4.67	0.005
<i>Coffea arabica</i> L.	1693.49	1.693
<i>Lippia myriocephala</i> Schlttdl. & Cham.	2.99	0.003
Total	1716.86	1.720

Contenido de carbono en herbáceas y necromasa

El almacenamiento de carbono en herbáceo y necromasa se encontró valores similares. En herbáceas tuvieron un almacenamiento de 4.69 Mg C ha⁻¹ y en necromasa con 5.33 Mg C ha⁻¹ (Tabla 16), respectivamente. En ambos compartimentos se obtuvo un almacenamiento total de carbono 10.01 Mg C ha⁻¹.

Tabla 16. Almacenamiento de carbono en herbáceas y necromasa del sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.

Componente	Carbono total en kg C ha⁻¹	Carbono total en Mg C ha⁻¹
Herbáceo	4687.41	4.69
Necromasa	5326.39	5.33
Total	10013.80	10.01

Contenido de carbono en el suelo

El análisis de varianza mostró diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$) entre los horizontes en el contenido de carbono orgánico (Tabla 17). El horizonte A obtuvo 113.84 Mg COS ha⁻¹, y superó con el 47.9% al horizonte B (59.35 Mg COS ha⁻¹), mientras que el horizonte E tuvo 61.69 Mg COS ha⁻¹ (Figura 23), se identificó que los horizontes a mayor profundidad se fue reduciendo el carbono orgánico. En general el COS total fue de 283.99 Mg C ha⁻¹ a la profundidad de un metro.

Tabla 17. Contenido de carbono orgánico en el suelo por horizonte del sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.

Capa del suelo	Mg COS ha⁻¹	n	E.E	Asignación
Horizonte A	113.84	4	12.34	A
Horizonte E	61.69	4	12.34	B
Horizonte B	59.35	4	12.34	B
Horizonte C	49.11	4	12.34	B
Total	283.99			

Valores con la misma letra no son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$).

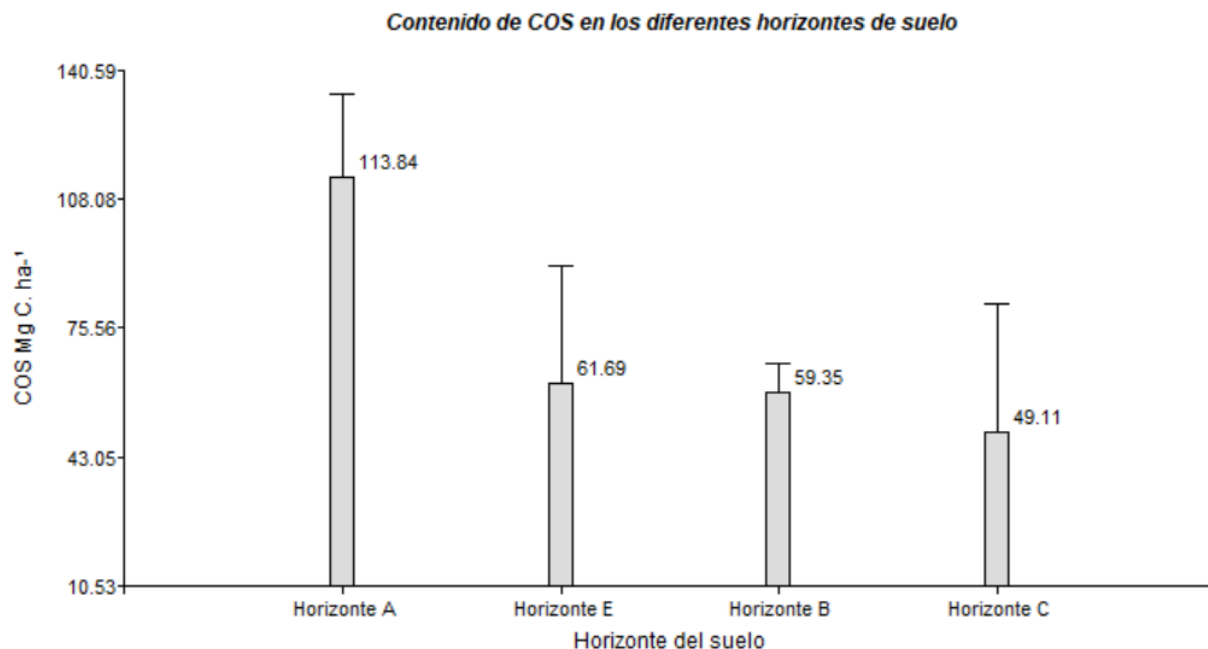


Figura 23. Contenido de carbono orgánico en diferentes horizontes del suelo en el sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.

Carbono almacenado en los componentes en un sistema agroforestal con café

El análisis de varianza mostró diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$) entre los compartimentos del sistema agroforestal. En el suelo a una profundidad de un metro, presentó un almacenamiento de carbono de 283.99 Mg COS ha⁻¹, en los árboles (parte aérea) con 44.19 Mg C ha⁻¹, necromasa con 5.33 Mg C ha⁻¹, herbáceas con 4.69 Mg C ha⁻¹ y arbustos con 1.72 Mg C ha⁻¹ (Figura 24). Los promedios obtenidos por Tukey indica que el componente suelo tuvo 71 Mg COS ha⁻¹, en el componente sobre el suelo la necromasa fue mayor (5.33 Mg C ha⁻¹) que el resto de los compartimentos aéreos del sistema agroforestal (Tabla 18). El sistema agroforestal estudiado logra un almacenamiento de carbono de 339.92 Mg C ha⁻¹ en los cinco componentes (árboles, arbustos, herbáceos, necromasa y suelo).

Carbono almacenado en un sistema agroforestal en Chenalhó, Chiapas

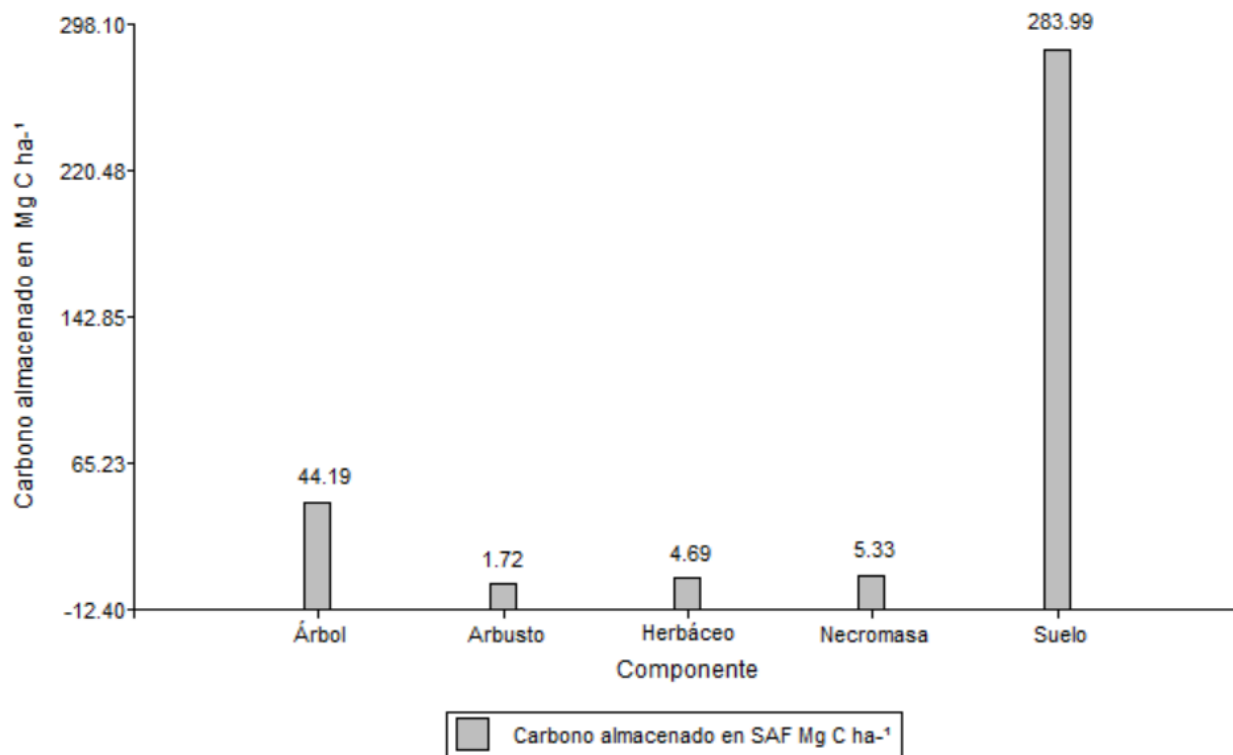


Figura 24. Almacenamiento de carbono en un sistema agroforestal con café y árboles nativos en Chenalhó, Chiapas.

Tabla 18. Valores promedio en los cinco compartimentos en el sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas.

Componente	Promedio Mg C ha ⁻¹	n	E.E	Asignación
Arbusto	0.34	5	4.13	B
Árbol	1.84	24	1.88	B
Herbácea	4.69	4	4.61	B
Necromasa	5.33	4	4.61	B
Suelo	71.00	4	4.61	A

Valores con la misma letra no son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$)

X. DISCUSIÓN

Riqueza de especies

Los datos obtenidos de la investigación en un sistema agroforestal están conformados principalmente con *Coffea arabica* con la cantidad de 1582 plantas y como especies de sombra está *Inga edulis*. También existen otras especies arbóreas y arbustivas nativas como *Liquidambar styraciflua*, *Quercus* sp., *Cupressus* sp., entre otros, siendo en total 213 individuos de árboles por hectárea que se asocia con el café, distribuidas en 29 especies.

Esta riqueza florística fue superior en comparación con lo obtenido por Salgado-Mora *et al.* (2007), donde encontraron la densidad de 76-108 árboles por hectárea en sistemas agroforestales con *Coffea arabica* en el Soconusco Chiapas, México. Mientras que, Reyes-Reyes *et al.* (2022) reportaron la densidad de 279 árboles en un sistema agroforestal con *Coffea arabica* en el mismo municipio de Chiapas. En contraste, con lo reportado por Soto-Pinto *et al.* (2001), al mencionar que la densidad promedio de árboles en los agroecosistemas de cafetal bajo sombra como hábitat para la fauna asociada en el norte de Chiapas es de 371.4 árboles por hectárea.

La riqueza florística en los SAF con café se debe a la forma tradicional de producción al mantener algunos individuos forestales nativos. La riqueza de especies arbóreas en el área natural del bosque mesófilo de montaña se puede encontrar hasta 228 individuos por hectárea (Verdugo-Morales *et al.*, 2022). Esta riqueza de especies de flora permite la producción y acumulación de biomasa sobre el suelo, así como el almacenamiento de carbono en las estructuras de los árboles.

Concentración de carbono en los componentes

La concentración de carbono en árboles en sistema agroforestal con café fueron (*Quercus crispipilis* 52.6%, *Myrsine coriacea* 50.91% y *Pinus maximinoi* 49.02%) superiores respecto a lo reportado por Figueroa-Navarro *et al.* (2005), quienes encontraron que la concentración de carbono en algunas especies de árboles en el bosque mesófilo de montaña en Oaxaca como el género *Quercus* fue de 49.5%, en

género *Pinus* con 46.8%, *Liquidambar* con 44.9%. Mientras que Jiménez *et al.* (2013), reportan valores obtenidos en *Quercus laceyi* con 48.18%, *Quercus rysophylla* con 47.98% y *Quercus canbyi* con 49.14%, en el bosque de pino-encino en la Sierra Madre Oriental.

A su vez, Navarro-Martínez (2019) en un estudio realizado en la microcuenca del río Hueyapa, Guerrero, México, encontró que en género *Quercus* tiene una concentración de carbono de 48.9%, siendo similar con los valores en este estudio. Además, Aquino-Ramírez *et al.* (2018) mencionan que la concentración de carbono encontrada en el género *Inga* en el Sur de Oaxaca fue de 46.20%. También, Pérez-Martínez (2011) menciona que la concentración de carbono en cedro rojo en Tepehuacán de Guerrero, Hidalgo fué de 45.25%. estos valores son similares con los datos en este estudio.

En cuanto al *Coffea arabica* con producción de café bajo sombra, Figueroa-Navarro *et al.* (2005), encontraron una concentración de carbono de 41.4%, en un estudio realizado en la Sierra Norte de Oaxaca. También se presentó una gran similitud en la fracción de carbono en *B. cordata* reportado por Razo-Zárte *et al.* (2015) en el parque nacional El Chico, Hidalgo, México, con 43% de carbono en esta especie arbustiva. Estos valores están dentro de los parámetros que reporta la FAO donde dice que las especies arbóreas contienen alrededor de 50% de carbono en su biomasa.

En tanto, la concentración de carbono en el componente de herbáceo es similar con lo reportado por Acosta (2003) en herbáceas nativas en bosque de ladera en México con intervalo de 23 a 40%. Por su parte Razo-Zárte *et al.* (2015), reportan datos similares en las herbáceas estudiadas en el Parque Nacional El Chico, en donde puede contener en promedio 43% de carbono. A su vez, Morales-Inocente *et al.* (2020), mencionan que las herbáceas contienen 36.13% de carbono en un bosque de El Salto, Durango, siendo, superior los datos en la presente investigación con 44.12% en dicho estrato.

La fracción de carbono en necromasa en este estudio fue de 46.75, superior a la investigación realizada por Figueroa-Navarro *et al.* (2005), donde mencionan que el

porcentaje de carbono promedio en la hojarasca de todos los sistemas forestales y acahuales fue 44.7%, en la sierra norte de Oaxaca, así como, los resultados obtenidos por Morales-Inocente *et al.* (2020), donde mencionan que en necromasa contiene 43.27% de carbono en un bosque de El Salto, Durango y Fonseca-Gonzales y Rojas-Vargas (2016) en un estudio plantaciones de bambú en Costa Rica, encontró 36.4% en necromasa.

El promedio de la fracción de carbono orgánico del suelo (COS) fue de 2.53%, siendo, similar los datos obtenidos en este estudio en comparación con los valores de 2.45% reportado por Fonseca-Gonzales y Rojas-Vargas (2016) en un estudio plantaciones de bambú en Costa Rica. En contraste, se obtuvo valores inferiores en este estudio respecto a la investigación realizado por Silva y Olaya (2019) en donde reportan que una profundidad de 20 cm encontró 3.38% de carbono orgánico en un sistema agroforestal de café (*Coffea arabica*), asociado con guaba (*Inga edulis*), distrito Jaén – Cajamarca, Perú.

La concentración de carbono en las especies posiblemente se debe a la densidad de cada especie, esto, depende de varios factores como la cantidad y tipo de elementos celulares que la constituyen, las condiciones climáticas en que crecen y a menudo la edad de las plantas. Las especies de rápido crecimiento son menos densas que las de lento crecimiento con el caso de *Quercus crispipilis* en comparación con el *Croton draco*.

Almacenamiento de carbono arbóreo

Las especies arbóreas con mayor almacenamiento de carbono aéreo en este estudio fueron *Cupressus lusitanica* con 3.6 Mg C ha⁻¹, *Liquidambar styraciflua* con 13.6 Mg C ha⁻¹ e *Inga edulis* con 17.4 Mg C ha⁻¹. Siendo un almacenamiento de carbono aéreo total en árboles de 45.90 Mg C ha⁻¹, distribuidas en 213 individuos y 29 especies. Estos valores fueron inferiores respecto a lo reportado por Rodríguez-Laguna *et al.* (2006), en un estudio realizado en el bosque mesófilo de montaña en la reserva de la biosfera El Cielo, donde reporta 56.7 Mg C ha⁻¹ almacenado en los fustes de los árboles en este

tipo de vegetación. En tanto, Navarro-Martínez *et al.* (2020) encontró datos superiores en un estudio en la microcuenca del Río Hueyapa, Guerrero, México, menciona que una vegetación de pino-encino y vegetación de encino pueden almacenar 78.04 y 69.94 Mg C ha⁻¹, respectivamente.

Así como, Pimienta-de la Torre *et al.* (2019) en un estudio sobre contenido de carbono en *Pinus maximinoi* en la Frailesca, Chiapas, reporta que un individuo de esta especie con diámetro normal (DN) de 35 cm puede almacenar 0.246 Mg C, lo cual, es superior con lo que se reporta en este estudio, ya que se obtuvo un 0.186 Mg C con un DN de 37 cm. También, González-Zárte (2008) en un estudio sobre *Pinus maximinoi* en el norte de Chiapas encontró que puede almacenar carbono hasta 80.98 Mg C ha⁻¹. Mientras que, Cortes-Pérez *et al.* (2019) reportan que el carbono encontrado en un bosque templado con aprovechamiento de Santiago Comaltepec, Oaxaca, México, con *Pinus patula* y *Pinus pseudostrobus* fueron de 24 Mg C ha⁻¹ y 21.3 Mg C ha⁻¹ respectivamente.

La diferencia entre los contenidos de carbono en las especies tal vez sea por la densidad de la madera de cada uno, así como, la abundancia, el diámetro, altura, la dinámica de crecimiento y la concentración de carbono de cada uno. Habitualmente, las especies que tienen un alto valor económico, los dendroenergéticos y las que generan sombra para café son más abundantes en estas áreas de producción.

Almacenamiento de carbono en arbustos

En cuanto al almacenamiento de carbono encontrado en este estudio en el compartimento arbustivo fue de 1.71 Mg C ha⁻¹, incluidas los individuos de *Coffea arabica*. Los resultados obtenidos fueron similares con los datos encontrados por Acosta-Mireles *et al.* (2020) donde mencionan que los arbustos y herbáceas puede almacenar aproximadamente de 1.5 Mg C ha⁻¹ en el contenido de carbono en un bosque sin manejo en Jalisco, México. Sin embargo, el valor del presente trabajo en este compartimento fue superior respecto con los datos encontradas por Rojas-Barrera (2019) en su trabajo de investigación realizado en Parque Nacional “El Chico”, Estado

de Hidalgo, donde, encontró que los arbustos pueden almacenar 0.55 M C ha^{-1} . En contraste, con los resultados obtenidos por Aquino-Ramírez *et al.* (2020) en un estudio en SAF con café en Oaxaca, donde, mencionan que la especie *Coffea arabica* almacena hasta $2.09 \text{ Mg C ha}^{-1}$, siendo superior con los que se obtuvo en este estudio. Por su parte, Tlaxcala-Méndez *et al.* (2021 y 2022) encontraron cifras de 103.70 y 109.29 (107.61 en árboles y 1.68 en los cafetos) Mg C ha^{-1} en la parte aérea en un sistema agroforestal tradicional con café en Zongolica, Veracruz, siendo muy superior con lo que se obtuvo en este estudio.

La planta de café es la especie de alto valor económico y con mayor número de ejemplares en este modo de producción agrícola y por ello almacena más carbono que otras especies arbustivas presentes en estos lugares.

Almacenamiento de carbono en herbáceas

El potencial de almacenamiento de carbono en las herbáceas en el sitio estudiado fue de $4.69 \text{ Mg C ha}^{-1}$, estos resultados muestran mejor capacidad de almacenamiento de carbono en comparación con los datos de Rojas-Barrera (2019) en su trabajo de investigación realizado en Parque Nacional “El Chico”, Estado de Hidalgo, donde, encontró que las herbáceas pueden almacenar hasta $2.30 \text{ Mg C ha}^{-1}$. También, Aguirre *et al.* (2018), mencionan que encontraron un almacenamiento de carbono en el estrato herbácea con $2.96 \text{ Mg C ha}^{-1}$ y en arbustos con 2.7 Mg C ha^{-1} en los bosques andinos, esta última, presenta valores muy similares con el presente estudio.

El manejo de las hierbas en estos sitios de producción incide de manera directa en las especies herbáceas presentes y probablemente sea el motivo de la cantidad de carbono que almacena en este componente. Generalmente, las herbáceas se presentan en periodos cortos, que, por lo usual, se exponen cuando se realiza la poda de los árboles de sombra para café, además, a menudo se hace de dos a tres chapeos al año en los cafetales, por lo tanto, la contribución de las herbáceas en el almacenamiento de carbono es limitada.

Almacenamiento de carbono en necromasa

En cuanto al almacenamiento de carbono en el componente necromasa fue de 5.33 Mg C ha⁻¹. Con ello, son similares los valores reportados por Acosta-Mireles *et al.* (2020), sobre un estudio en Jalisco, México, al encontrar que en las hojarascas en parcelas con especies de *Enterolobium cyclocarpum* puede contener 6.36 Mg C ha⁻¹. Además, Zaninovich (2017) reporta en un estudio en el bosque Atlántico Semidecidual de Argentina, una acumulación de carbono en necromasa de 4 Mg C ha⁻¹ en un bosque de pino con dosel cerrado, algo muy similar con este estudio. Así como, Sarango-González y Tenempaguay-Guncay (2020) en un bosque de pino en la provincia de Loja, Ecuador, donde, reportan que en la necromasa pueden almacenar 3.2 Mg C ha⁻¹. Sin embargo, son superiores los datos en este estudio respecto a lo reportado por Rodríguez-Laguna *et al.* (2008), en un estudio en la reserva de la biosfera el cielo, Tamaulipas, donde, mencionan que la necromasa se almacena 0.7 Mg C ha⁻¹. Contrario a lo que reporta Leyva-Pablo *et al.* (2020), en un estudio realizado en la Sierra Norte de Oaxaca señalan que un bosque pino-encino puede almacenar hasta 38.6 Mg C ha⁻¹ en los mantillos, siendo muy superior el resultado en comparación con lo que se obtuvo en la presente investigación. También, Aguirre *et al.* (2018), indican que encontraron un almacenamiento de carbono en necromasa de 10.07 Mg C ha⁻¹ en los bosques andinos, siendo también superior en comparación con este estudio.

De acuerdo con Aguirre *et al.* (2018), mencionan que el potencial de almacenamiento de carbono en el componente aéreo (árboles, arbustos, hierbas y necromasa) pueden contener 42.29 Mg C ha⁻¹, lo cual, se asemeja con los resultados en este trabajo, puesto que, se tiene 55.9 Mg C ha⁻¹.

La variación en el almacenamiento de carbono en este componente, quizás sea por el manejo de los cafetales. Por lo general, contiene poca necromasa ya que se aprovecha toda la materia leñosa para uso doméstico, quedando únicamente las hojas de los árboles, ramas menores de 2 cm de diámetro y hierbas muertas.

Almacenamiento de carbono en el suelo

El contenido de carbono orgánico en el suelo del presente estudio fue de 283.99 Mg COS ha⁻¹ a una profundidad de 1 m, en tanto, el horizonte A presentó un valor de 113.84 Mg COS ha⁻¹ a un espesor de 18.3 cm. Este resultado fue superior respecto a lo reportado por Acosta-Mireles *et al.* (2020), donde encontró 37.68 Mg COS ha⁻¹ a la profundidad de 0 a 15 cm en una parcela con plantación de parota (*Enterolobium cyclocarpum*), en Jalisco, México y en la medida que aumenta la profundidad disminuye el COS.

También Meraz-Jiménez *et al.* (2020), en un estudio realizado en Aguascalientes, menciona que un Leptosol puede almacenar 63.00 Mg COS ha⁻¹. A su vez, Castelán-Vega *et al.* (2020a), encontraron que, en un suelo bajo manejo forestal con vegetación de bosque templado en Tlahuapan, Puebla, puede almacenar hasta 194.00 Mg COS ha⁻¹, a una profundidad de 30 cm. Castelán-Vega *et al.* (2020b), encontraron que, en un pastizal inducido en Tepanco de López, Puebla, puede contener 63 Mg COS ha⁻¹, mientras que en áreas con cultivo almacena 57 Mg COS ha⁻¹, lo cual, es superior el almacenamiento encontrado en este estudio, considerando a una profundidad de un metro. Además, Zaninovich (2017) reporta en un estudio realizado en el bosque Atlántico Semideciduo de Argentina, la acumulación de COS de un bosque de pino con dosel cerrado de 40.00 Mg COS ha⁻¹, algo muy similar con este estudio. Contrario, con lo que señalan Sarango-González y Tenempaguay-Guncay (2020), en su estudio en un bosque de pino en la provincia de Loja, Ecuador, donde, reportaron que los suelos son grandes almacenes de carbono al reportar un COS de 328.73 Mg COS ha⁻¹, siendo mayor que en este estudio.

El carbono orgánico en los horizontes del suelo depende directamente de la deposición de la materia orgánica proveniente de los factores bióticos y la variación del COS son atribuibles al uso y manejo de las mismas, sin embargo, la capa superficial (horizonte A) generalmente contiene más materia orgánica en comparación con los demás horizontes, de modo que puede contener más COS y en menor cantidad en el horizonte C por ser la capa más profunda.

Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales

La capacidad de almacenamiento de carbono en el área de estudio fue de 319.00 Mg C. ha⁻¹. Valor superior al estudio de Espinosa-Domínguez *et al.* (2012), encontraron que en los sistemas agroforestales con café y árboles de cedro rosado en el estado de Veracruz pueden acumular 115.00 Mg C ha⁻¹ en la parte aérea y 58.00 Mg COS ha⁻¹ en suelo a una profundidad de 30 cm con la misma combinación de café con cedro rosado, siendo un total de 173.00 Mg C ha⁻¹. Así como, Lara-Nucamendi (2019), menciona que el acumulamiento de carbono en silvopastoriles con árboles dispersos llega a 6.80 Mg C ha⁻¹ en un área de la reserva de la biosfera La Sepultura, Chiapas. Además, Roncal-García *et al.* (2008), reportaron que el almacenamiento de carbono tanto en la parte aérea como en suelo en un sistema milpa tradicional con árboles y sistema Taungya en Chilón, Chiapas fueron 127.90 y 109.40 Mg C ha⁻¹, respectivamente. También, Perez (2019), señalan que los sistemas agroforestales con café en la comunidad de Ixcatla, municipio de Ixhuatlán del Café, Veracruz almacenan 138.05 Mg C ha⁻¹.

Por su parte, Hernández-Núñez *et al.* (2021), mencionan que un sistema agroforestal con café en los Llanos Orientales de Colombia, almacena 57.8 Mg C ha⁻¹ (15.00 Mg C ha⁻¹ en aéreo y 42.80 Mg COS ha⁻¹ en el suelo a una profundidad de 20 cm). A la vez, Conolly y Corea, (2007) afirman que los sistemas agroforestales con café en el municipio de Jinotega, Managua, Nicaragua, almacena 163.88 Mg C ha⁻¹, de los cuales, 18.72 Mg C ha⁻¹ corresponde a la parte aérea y 145.16 Mg C ha⁻¹ entre suelo y raíces. También, Rodríguez-Laguna *et al.* (2007), encontraron que en un bosque tropical subcaducifolio en la reserva de la biosfera el cielo, Tamaulipas, México, almacena hasta 94.6 Mg C ha⁻¹ en el componente aéreo. Lo cual, estos valores reportados son menores respecto al presente estudio.

Las vegetaciones primarias albergan grandes cantidades de carbono como menciona Salgado-Mora *et al.* (2018), encontró que, en los bosques primarios en la península de Osa, Costa Rica, almacena carbono en la biomasa aérea en los árboles hasta 245.09 Mg C ha⁻¹. También, con Cortés-Pérez *et al.* (2021), señalan que en bosque templado

sin manejo (Natural) en Oaxaca puede almacenar carbono hasta 164.7 Mg C ha⁻¹, siendo superior los valores en este estudio. Sin embargo, Pérez (2011), encontró que el almacenamiento de carbono en un bosque de oyamel, cedro y pino en el cerro Tlálloc, Texcoco, México puede contener hasta 334.00 Mg C ha⁻¹ incluyendo tanto la parte aérea como el suelo, siendo similar con las cifras obtenido en este estudio.

La capacidad de almacenamiento de carbono en los sistemas agroforestales depende de varios factores, pueden ser atribuirse a la heterogeneidad de los SAF, en ello, está relacionada con la densidad de plantación, manejo del sistema, edad de los individuos presentes, composición de la misma (especies presentes en el área), estructura vertical, diversidad, metabolismo de las plantas y las estructuras anatómicas de cada especie. Además del patrón de crecimiento de los árboles que está intrínseco con las condiciones de cada sitio como el clima, suelo, tipología de cafeto, entre otras variables, que permite la acumulación de biomasa aérea en el área, así como, la incorporación de materia orgánica en el suelo. Esto, influye en el contenido de carbono dentro del sistema agroforestal.

XI. CONCLUSIONES

El sistema agroforestal con café en Chenalhó, Chiapas a través de su manejo tradicional genera beneficios económicos y ecosistémicos a la población, esto se debe por la conservación de la diversidad de plantas nativas propias del bosque mesófilo de montaña ya que se encontró 24 especies de árboles y 5 especies de arbustos, además de capturar y almacenar grandes cantidades de carbono atmosférico en el estrato aéreo y en el suelo como carbono orgánico.

Se presentaron cuatro horizontes de suelo en el sistema agroforestal con café y plantas nativas (profundidad de 1 metro), el horizonte A contiene dos veces más cantidad de carbono orgánico que el horizonte E, B y C de modo que, son importantes sumideros de carbono que contribuyen a la mitigación del calentamiento global.

El estrato arbóreo tuvo mayor cantidad de carbono almacenado seguido de necromasa, herbáceas y por último el arbustivo, este último se debió a que dos veces al año se realizan chapeos en el área para dejar libre de competencia a las plantas de café, y con el tiempo se incorporan al suelo lo que genera el aumento en el contenido de carbono orgánico en el suelo dando la suma total de 339.92 Mg C ha⁻¹ en el sistema agroforestal con café.

Los árboles nativos como *Quercus crispipilis*, *Myrsine coriacea* y *Pinus maximinoi* presentaron mayor concentración de carbono en el componente aéreo, debido a la densidad alta de la madera permitiendo almacenar grandes cantidades carbono además de sombra y condiciones ambientales para el desarrollo del café.

RECOMENDACIONES

Ante la inminente degradación de los recursos naturales, en especial el bosque mesófilo de montaña (siendo la vegetación original en el sitio de interés) por el aumento de la frontera agrícola con monocultivos, la implementación de los sistemas agroforestales es cada vez más importante para tratar de preservar los servicios ecosistémicos. Para ello, el uso de las especies regionales en estos sistemas es de vital importancia. Por lo tanto, se sugiere que en los futuros diseños de los sistemas agroforestales con café se incluya las especies arbóreas forestales nativas de mayor concentración de carbono en su biomasa, tales como *Quercus crispipilis*, *Myrsine coriacea* y *Pinus maximinoi* para potencializar la captura de carbono y mantener la biodiversidad del sitio.

Aunado a la introducción de plantas, es fundamental evitar la producción de los cultivos de forma monocultivo, puesto que, altera la funcionalidad del ecosistema y favorece la degradación de los suelos. Por lo que, se sugiere hacer énfasis en los nuevos diseños y tecnologías agroforestales en considerar establecer árboles de alto valor ambiental que coadyuven en la captura de carbono y la asimilación de diversos contaminantes presentes en el área.

XII. REFERENCIAS

- Acosta M. M. (2003). Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícolas de ladera en México. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Edo. de Méx., México. 135 p.
- Acosta Mireles, M., Carrillo Anzures, F., Buendía Rodríguez, E., Benavides Solorio, J., Flores Ayala, E. y González Molina, L. (2020). Carbono en suelo, hierbas y arbustos en una plantación forestal en Jalisco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(6), 1377-1387. Consultado en octubre de 2021. Disponible en <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2427>
- Agencia Europea del Medio Ambiente. (2015). El suelo y el cambio climático. Consultado en agosto de 2022. Disponible en de <http://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2015/articu-los/el-suelo-y-el-cambio-climatico>
- Aguirre, Z., Quizhpe, W. y Pinza, D. (2018). Estimación del carbono acumulado en una parcela permanente de bosque andino en el parque universitario Francisco Vivar Castro, Loja, Ecuador. *Arnaldoa* 25 (3): 939-952. Disponible en DOI: <http://doi.org/10.22497/arnaldoa.253.25307>.
- Alliance of Bioversity & the International Center for Tropical Agriculture [CIAT]. (2017). ¿Cuánto carbono se almacena en los paisajes transformados de la Amazonía?. Consultado en agosto de 2022. Disponible en <https://alliancebioiversityciat.org/stories/cuanto-carbono-se-almacena-en-los-paisajes-transformados-de-la-amazonia>
- Aquino-Ramírez, M., Velázquez-Martínez, A., Etchevers-Barra, J.D., y Castellanos-Bolaños, J. (2018). Concentración de carbono en tres especies de árboles tropicales de la sierra sur de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 52(3), 455-465. Consultado en abril de 2023.

Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952018000300455&lng=es&tlng=es.

Arroyo, M. y Ramírez-Monroy, A. (2020). Dióxido de carbono, sus dos caras. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. *An. Quím.*, 116 (2), 81-87. Consultado en julio de 2023. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8109260.pdf>

ASERCA (Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios) (2017). Café de Chiapas. Consultado en agosto de 2022. Disponible en <https://www.gob.mx/aserca/articulos/cafe-de-chiapas?idiom=es>

Asociación Correntina de Plantadores de Arroz (2023). Argentina, entre los 10 países con mayor reserva de carbono en los suelos. Consultado en febrero de 2023. Disponible en http://www.acpaarrozcorrientes.org.ar/Paginas/Generales_1683.html

Balbontín Claudio, C., Cruz, C. O., Paz, F. y Etchévers, J. D. (2009). *Soil carbon sequestration in different ecoregions of Mexico*. In: Rattan Lal and Ronald F. Follett, (Eds). Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse Effect. 2nd edition. Special Publication 57. Madison, WI, USA.

Bardgett, R. y Wardle, D.A. (2010). Aboveground and belowground linkages. Biotic interactions, Ecosystem Process, and Global Change. Oxford University Press. New York, USA.

Beer, J., Harvey, C. A., Ibrahim, M. A., Harmand, J. M., Somarriba, E. y Jimenez Otárola, F. (2003). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. CATIE, Turrialba (Costa Rica). Disponible en <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/6806>

Brenes-Angulo, O., Reyes-Cordero, D. y Moya-Roque, R. (2012). Estudio de la anatomía del xilema secundario de seis especies del género Citrus cultivadas en Costa Rica. *Revista*

Forestal Mesoamericana Kurú (Costa Rica) volumen 9, No. 23. Consultado en agosto de 2022. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5123320>

Burbano Orjuela, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Rev. Cienc. Agr.* 35(1): 82-96. Disponible en doi: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.183501.85>.

Bustamante-García, V., Carrillo-Parra, A., González-Rodríguez, H., Ramírez-Lozano, R. G., Corral-Rivas, J. J. y Garza-Ocañas, F. (2013). Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxyla*. Humb., & Bonpl. in Brazilian beehive kiln. *Industrial Crops and Products* 42: 169-174. Consultado en julio de 2023. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669012002245?via%3Dihub>

Caballero, M., Lozano, S. y Ortega, B. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista Digital Universitaria*. Volumen 8 (10). 02 -12. Consultado en abril de 2023. Disponible en https://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/oct_art78.pdf

Caballero J., Cortés L. y Martínez Balleste A. (2010). El manejo de la biodiversidad en los huertos familiares. *La biodiversidad de México. Inventarios, manejos, usos, informática, conservación e importancia cultural*, pp. 220-234, Fondo de Cultura Económica/ Consejo Nacional para la Cultura y las Artes. México, D.F.

Carbajal Avila, J., Rodríguez Rosales, A. A., Ávila Caballero, L. P., Rodríguez Herrera, A. L., & Hernández Cocoltzi, H. (2017). Captura de carbono por una fachada vegetada. *Acta Universitaria*, 27(5): 55-61. Disponible en doi: 10.15174/au.2017.1388

Cartuche Peralta, K. M. (2022). Caracterización de la madera de 95 especies forestales del sur de Ecuador con base a sus propiedades físicas, organolépticas y anatómicas.

[Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Loja]. Consultado en abril de 2022. Disponible en file:///C:/Users/cheri.BM2/Downloads/CartucheKeyla.2022.Caracterizacindelamaderade95sppforestales-TEISISFINAL_23ene2022.pdf

Castelán-Vega, R., González-González, F., Tamaríz-Flores, V. y Cruz-Montalvo, A. (2020a). Estimación del carbono orgánico en suelos con manejo forestal de Tlahuapan, Puebla. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis 2020. Programa Mexicano del carbono. Pp. 416-420. Consultado en julio de 2022. Disponible en https://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/count.php?file=EACCIM_Sintesis_2020-22

Castelán-Vega, R., Ramírez-García, A., Tamaríz-Flores, V. y Cruz-Montalvo, A. (2020b). Almacén de carbono orgánico en suelos semiáridos de una cuenca hidrográfica de Tepanco de López, Puebla, México. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis 2020. Programa Mexicano del carbono. Pp. 421-424. Consultado en julio de 2022. Disponible en https://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/count.php?file=EACCIM_Sintesis_2020-22

Caviglia, O.P., Wingeyer, A.B. & Novelli, L. E. (2016). El rol de los suelos agrícolas frente al cambio climático. Serie de Extensión INTA Paraná. 78:27-32.

Chave, J., Coomes, D. A., Jansen, S., Lewis, S. L., Swenson, N. G., y Zanne, A.E. (2009). Towards a worldwide wood economics spectrum (Global Wood Density Database). *Ecology Letters*, 12(4): 351-366. Disponible en doi:10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x

Chazdon, R., Letcher, S., Breugel, M., Martinez, M., Bongers, F., Finegan, B. (2007). Rates of change in tree communities of secondary tropical forests following major disturbances. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 362 (1478): 273-289. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2006.1990>

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2012). Estrategia Nacional de Agrosilvicultura. Jalisco, México. Consultado en octubre de 2021. Disponible en <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/5/4151Estrategia%20Nacional%20de%20Agrosilvicultura.pdf>

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2023). Cambio climático. Consultado en junio de 2023. Disponible en <https://www.biodiversidad.gob.mx/planeta/cambioclim>

Conde, C. (2011). México y el cambio climático Global. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Consultado en septiembre de 2021. Disponible en <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Cecadesu/Libros/Mexico%20y%20el%20cambio%20climatico.pdf>

Conolly Wilson, RY. y Corea Siu, CA. (2007). Cuantificación de la captura y almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales y forestales en seis sitios de cuatro municipios de Nicaragua. [Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Agraria]. Managua, Nicaragua. Consultado en julio de 2023. Disponible en <https://core.ac.uk/download/pdf/35164844.pdf>

Cortés-Pérez, M., Leyva-Pablo T., Fuentes-Ponce, M., De León-González, F., Paz-Pellat, F. y Santiago-García, W. (2019). Biomasa y carbono arbóreo aéreo del bosque templado con aprovechamiento de Santiago Comaltepec, Oaxaca, México. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis 2019. Programa Mexicano del carbono. Consultado en agosto de 2022. Disponible en https://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/count.php?file=EACCIM_Sintesis_2019-22

Cortés-Pérez, M., De León-González, F., Paz-Pellat, F., Leyva-Pablo T., Santiago-García, W., Ponce-Mendoza, A. y Fuentes-Ponce, M. (2021). Almacenamiento de carbono aéreo en

un bosque templado de Oaxaca: manejo de alta y baja intensidad. *Madera y Bosques* vol. 27(4), e2742440. doi: 10.21829/myb.2021.2742440.

Cotler, H., M. Martínez y J. D. Etchevers. (2016). Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación políticas públicas. *Terra Latinoamericana* 34: 125-138. Consultado en julio de 2023. Disponible en <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n1/2395-8030-tl-34-01-00125.pdf>

De Jong, B., Tipper, R. y Taylor, R. (1997). 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* 2: 231-246.

De la Paz P.O., C. y R. Dávalos-Sotelo. (2008). Algunas características anatómicas y tecnológicas de la madera de 24 especies de *Quercus* (encinos) de México. *Madera y Bosques* 14(3): 43-80. Consultado en agosto de 2022. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712008000300003&lng=es&tlng=es.

Espinoza-Domínguez, W.; Krishnamurthy L., Vázquez-Alarcón, A. y Torres- Rivera, A. (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 18(1): 57-70. Consultado en septiembre de 2021. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/629/62924537005.pdf>

Figueroa-Navarro, C.; Etchevers-Barra, J. D.; Velázquez-Martínez, A.; Acosta-Mireles, M. (2005). Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la Sierra Norte de Oaxaca. *Terra Latinoamericana* 23(1): 57-64, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/573/57323108.pdf>

Flores Delgadillo, L. y Alcalá Martínez J. R. (2010). Manual de Procedimientos Analíticos. Laboratorio de física de suelos. Instituto de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México. Consultado en mayo de 2023. Disponible en <https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>

Fonseca-González, W. y Rojas-Vargas, M. (2016). Acumulación y predicción de biomasa y carbono en plantaciones de bambú en Costa Rica. *Ambiente y Desarrollo*, 20 (38): 85-98. Disponible en <http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana.ayd20-38.apbc>

Galicia, L., Gamboa Cáceres, A. M., Cram, S., Chávez Vergara, B., Peña Ramírez, V., Saynes, V. y Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1): 1-29. Consultado en julio de 2023. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000100001&lng=es&tlng=es.

Gálvez, M. E., Fischer, W. W., Jaccard, S. L., Eglinton, T. I. (2020). Materials and pathways of the organic carbon cycle through time. *Nature Geoscienc*, 13 (8): 535-546. Disponible en <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0563-8>

González Zárate. M. (2008). Estimación de la biomasa aérea y captura de carbono en regeneración natural de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, *Pinus oocarpa* var. ochoterenai Mtz. y *Quercus* sp. en el norte del Estado de Chiapas, México. Tesis de Posgrado. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 97 p. Consultado en junio de 2023. Disponible en https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/4965/Estimacion_de_la_biomasa_aerea.pdf?sequence=1&isAllowed=y

González, M. L., Etchevers, B. J. D. y Hidalgo, M. C. (2008). Carbono en suelos de ladera: factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia*, 42: 741-751. Consultado en julio de 2022. Disponible en

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-3195200800070000

1

Gómez Balvas, S., Rodríguez, S. y López Portillo, V. (2022). Las oportunidades del carbono azul en México. Consultado en junio de 2023. Disponible en <https://wrimexico.org/bloga/las-oportunidades-del-carbono-azul-en-m%C3%A9xico#:~:text=El%20carbono%20azul%20en%20los%20manglares%20de%20M%C3%A9xico&text=Se%20estima%20que%20el%20total,de%201.16%20gigatoneladas%20de%20CO2> e.

Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., Mora-Olivo, A. y Buendía-Rodríguez, E. (2019). Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono en un bosque de clima templado-frío de Durango, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(2): 119-127. Consultado en julio de 2023. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802019000200119&lng=es&tlng=es

Grupo de Investigación Sostenibilidad, Infraestructura y Territorio [SITE]. (2023). Catálogo virtual de flora del Valle de Aburrá. Universidad EIA. Consultado en septiembre de 2022. Disponible en <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/90>

Harmon, M.E., Franklin, J.F., Swanson, F.J., Sollins, P., Gregory, S.V., Lattin, J.D., Anderson, N.H., Cline, S.P., Aumen, N.G., Sedell, J.R., Lienkaemper, G.W., Cromack, K. y Cummins, K.W. (1986). Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advanced Ecology Research*, 15: 133–302. Consultado en mayo de 2023. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S006525040860121X>

Hartmann, J., West, A. J., Renforth, P., Köhler, P., De La Rocha, C. L., Wolf-Gladrow, D. A., Scheffran, J. (2013). Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification.

Reviews of Geophysics. 51 (2): 113-149. Disponible en <https://doi.org/10.1002/rog.20004>

Hernández-Núñez, HE, Andrade, HJ, Suárez-Salazar, JC, Sánchez A., JR, Gutiérrez S., DR, Gutiérrez-García, GA, Trujillo-Trujillo, E., y Casanoves, F. (2021). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales en los Llanos Orientales de Colombia. *Revista de Biología Tropical* 61(1):352-368. Disponible en DOI:[10.15517/rbt.v69i1.42959](https://doi.org/10.15517/rbt.v69i1.42959).

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2015). Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INECC/SEMARNAT, México. Disponible en <https://www.gob.mx/inecc/documentos/primer-informe-bienal-de-actualizacion-ante-la-convencion-marco-de-las-naciones-unidas-sobre-el-cambio-climatico>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2018). Gases y compuestos de efecto invernadero. Consultado en abril de 2023. Disponible en <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2021). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990 - 2019. Consultado en abril de 2023. Disponible en <https://www.gob.mx/inecc/articulos/presenta-inecc-el-inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-1990-2019-284532?state=published>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y Programa de las Naciones Unidas (INECC-PNUD México). (2017). Estudio para la identificación, caracterización y evaluación del balance entre las emisiones de GEIs y las zonas de captura y almacenamiento de carbono en zonas de ecosistemas costero/marinos del Pacífico, Golfo de México y la Península de Yucatán (Carbono azul). Proyecto 85488 “Sexta

Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”, 430 pp. Programa Mexicano del Carbono, A.C. México. Consultado en noviembre de 2022. Disponible en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/444387/CGACC_2017_Balance_entre_las_emisiones_de_GEIs_y_las_zonas_de_captura_y_almacenamiento_de_carbono_en_zonas_de_ecosistemas_costero-marinos_del_Pacifico_Golfo_de_Mexico_y_Yucatan.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2007). Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Serie II, escala 1: 250 000 (Continuo Nacional). México.

Instituto para el Desarrollo Sustentable en Mesoamérica, A.C. (IDESMAC). (2016). Capas Temáticas de Chenalhó. Consultado en agosto de 2023. Disponible en <https://www.idesmac.org/capas-tematicas-de-chenalho/>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (1996). Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton., J.T., L.G. Meira, A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg y K. Maskell (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. 572 págs.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noquer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell y C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Solomon, S., D. Qin, M.

Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller (eds.]). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013a). Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker TF, Qin D, Plattner G, Tignor M, Allen S, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V and Midgley M (Editors). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013b). Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. Consultado en abril de 2023. Disponible en https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_ES.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2018: Resumen para responsables de políticas. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza [Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.)]. Disponible en

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf

Janzen, H., (2004). Carbon cycling in earth systems: a soil science perspective. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(3), 399-417. Doi: 10.1016/j.agee.2004.01.040

Jaramillo, V., Kauffman, J., Rentería-Rodríguez, L. (2003). Reservas de biomasa, carbono y nitrógeno en paisajes de bosque seco tropical mexicano. *Ecosistemas* 6, 609-629. <https://doi.org/10.1007/s10021-002-0195-4>. Consultado el 23 de julio de 2023, de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10021-002-0195-4#citeas>

Jiménez Pérez, J., Treviño Garza, E. J. y Yerena Yamallel, J. I. (2013). Concentración de carbono en especies del bosque de pino-encino en la Sierra Madre Oriental. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(17): 50-61. Consultado en mayo de 2023. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322013000300006&lng=es&tlng=es.

Kumar, A., Kumar, N., P. Baredar, P. y Shukla, A. (2015). A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45: 530-539. Consultado en julio de 2023. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115000957>

Lara-Nucamendi, A. (2019). Almacenamiento de carbono en biomasa arbórea y suelo de prácticas silvopastoriles en la Reserva de la Biosfera La Sepultura, Chiapas. [Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Chiapas]. Chiapas, México. Consultado en junio de 2023. Disponible en <https://www.biopasos.com/informes/TesisFinalMaestria.pdf>

Leandro, L. (2009). Revisión bibliográfica de las densidades de especies maderables del proyecto TROPI-DRY. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal.

Le Treut H, Somerville R, Cubasch U, Ding Y, Mauritzen C, Mokssit A, Peterson T and Prather M. (2007). Historical Overview of Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M and Miller HL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Leyva-Pablo, T., Fuentes-Ponce, M., De León González F. y Cortés-Pérez, M. (2020). Contenido de carbono y nitrógeno del suelo y mantillo en dos manejos forestales en la Sierra Norte de Oaxaca. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis 2020. Programa Mexicano del carbono. Consultado en mayo de 2021. Disponible en https://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/count.php?file=EACCIM_Sintesis_2020-22

Losada, M. F. (2017). Revisión de métodos para la estimación de captura de carbono almacenadas en bosques naturales. Universidad Militar Nueva Granada. Disponible en <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/16394/Fen%C3%A1ndezLosadaMagdaYolima2017.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Martínez, J., y Borja de la Rosa, A. (2005). Características tecnológicas de la madera de palo morado (*Peltogyne mexicana* Martínez) de Tierra Colorada, Guerrero, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 11(1):78-82.

Martínez Romero, A. y Leyva Galán, A. (2014). La biomasa de los cultivos en el ecosistema. Sus beneficios agroecológicos. *Cultivos Tropicales*, 35(1): 11-20. Consultado en julio de 2023. Disponible en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362014000100002&lng=es&tlng=es.

Martínez Arroyo, M. A., Octaviano Villasana, C. A., Ramírez Hernández, I. F., Cárdenas Moreno, P. R., García García, M. A. y Cortés Alfaro, E. A. (2020). Lineamientos para el desarrollo de Inventarios de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, para los Gobiernos Estatales y Municipales [Archivo PDF]. Disponible en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/613436/90_2020_LineamientosElaboracionIEGyCEI.pdf

Mendoza, A. C., y Jiménez, N.G. (2017). Relación entre el efecto invernadero y el cambio climático desde la perspectiva del sector agrario. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, volumen (70), 3. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/1799/179951188001.pdf>

Meraz-Jiménez, A., Mendieta-Vázquez, A., López-Santos, A., Díaz-Romo, A., Martínez-Calderón V. y Torres-González J. (2020). Servicios ecosistémicos en suelos del ejido Ojo de Agua de los Montes, Aguascalientes. Universidad Autónoma de Aguascalientes. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis 2020. Programa Mexicano del carbono. Consultado en mayo de 2021. Disponible en https://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/count.php?file=EACCIM_Sintesis_2020-22

Mondragón, F. (2021). Ciclos del dióxido de carbono en la formación y utilización de combustibles fósiles y su efecto en el cambio climático. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 45(176):833-849. Consultado en julio de 2023. Disponible en doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1364>.

Montagnini, F. y Nair, P. K. R. (2004). Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61, 281 – 295. Disponible en <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029005.92691.79>

Morales-Inocente, M., Nájera-Luna, J., Escobedo-Bretado, M., Cruz-Cobos, F., Hernandez, F. y Vargas-Larreta, B. (2020). Carbono retenido en biomasa y suelo en bosques de El Salto, Durango, México. Universidad Autónoma de Aguascalientes. *Revista Investigación y Ciencia*, vol. 28, núm. 80, pp. 5-13. Consultado en junio de 2023. Disponible en <https://www.redalyc.org/journal/674/67464474001/html/#:~:text=Estos%20coeficientes%20son%2043.27%25%20para.el%20m%C3%A9todo%20de%20Walkley%2DBlack>.

Moreno-Calles, A. I., Toledo, V. M. y Casas, A. (2013). Los sistemas agroforestales tradicionales de México: Una aproximación biocultural. *Botanical Sciences*, 91(4), 375-398. Consultado en agosto de 2023. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-42982013000400001&lng=es&tlng=es.

Mundo verde. (2015). Los gases de efecto invernadero vuelven a batir un récord. Consultado en noviembre de 2023. Disponible de <https://www.vozdeamerica.com/a/cambio-climatico-gases-efecto-invernadero-baten-record/3049879.html>

Nair, P. K. R. (1993). An introduction to agroforestry. The Netherlands. Kluwer Academic Publishers. Consultado en agosto de 2021. Disponible en https://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/32_An_introduction_to_agroforestry.pdf?n=161

National Geographic. (2023). ¿Qué es el calentamiento global? National Geographic. Consultado en julio de 2023. Disponible en <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/que-es-el-calentamiento-global>

Navarrete, D.A., A.J. Duque, A.P. Yepes, J.F. Phillips, K.R. Cabrera, E.W. López, C.M. Rivera, M.C. García, M.F. Ordoñez. (2011). Madera muerta: un reservorio de carbono en bosques naturales de Colombia. Validación metodológica para su medición en el marco de proyectos REDD+. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales-IDEAM-. Bogotá D.C., Colombia. 29 p.

Navarro-Martínez, J. (2019). Plan de manejo silvícola para captura de carbono en la microcuenca del río Hueyapa, Guerrero, México. Tesis de Doctorado. Centro de Ciencias de Desarrollo Regional, Universidad Autónoma de Guerrero. Acapulco, Guerrero, México. 89 p. Consultado en junio de 2023. Disponible en http://ri.uagro.mx/bitstream/handle/uagro/1843/DT_16250292_19.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Navarro-Martínez, J., López-López, M., Rosas-Acevedo, J., Godínez-Jaimes, F., Juárez-López, A. y Reyes-Umaña M. (2020). Reservorios de biomasa y carbono aéreo en el bosque templado de la microcuenca del Río Hueyapa, Guerrero, México. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis 2020. Programa Mexicano del carbono. Consultado en mayo de 2021. Disponible en https://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/count.php?file=EACCIM_Sintesis_2020-22

Ordóñez Díaz, J.A.B., Galicia Naranjo, A., Venegas Mancera, N.J., Hernández Tejeda, Y., Ordóñez Díaz, M. J. y Dávalos-Sotelo, R. (2015). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y Bosques* 21(Núm. esp.):77-126. Consultado en julio de 2023. Disponible en <https://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v21nspe/v21nspea6.pdf>

Organización Meteorológico Mundial (OMM). (2024). La Organización Meteorológica Mundial confirma que en 2023 la temperatura mundial batió todos los récords. Consultado en enero de 2024. Disponible en <https://wmo.int/es/news/media-centre/la-organizacion-meteorologica-mundial-confirma->

[que-en-2023-la-temperatura-mundial-batio-todos-los#:~:text=La%20OMM%20ha%20to mado%20los,preindustriales%20\(1850%2D1900\).](#)

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1997). Estimating biomass and biomass change in tropical forests. FAO Forestry Paper. ISSN: 0259-2800; ISBN: 103955.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2005). Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2005. Disponible en <https://www.fao.org/3/a0400s/a0400s.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2015). El trabajo de la FAO sobre cambio climático. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Consultado en agosto de 2022. Disponible en <http://eird.org/ran-sendai-2016/presentaciones-evento-paralelo/documentos-de-interes/El-trabajo-de-la-FAO-sobre-Cambios-Climatico-2015.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2017). Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. Consultado en agosto de 2022. Disponible en <https://www.fao.org/3/i6937es/l6937ES.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2020). Términos y Definiciones. Evaluación de recursos forestales mundiales 2020. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. Consultado en junio de 2022. Disponible en <https://www.fao.org/3/l8661ES/i8661es.pdf>

Organización Internacional del Café (OIC). (2014). Producción total de los países exportadores de los años de cosecha de 2014/15. Consultado en octubre de 2021.

Disponible

en

<http://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/1a-total-production.pdf>

Pan, Y., Birdsey, R., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P., Kurz, W., Phillips, O., Shvidenko, A., Lewis, S., Canadell, J., Ciais, P., Jackson, R., Pacala, S., McGuire, A., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 333: 988, DOI: 10.1126/science.1201609

Pardos, J. A. (2010). Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Madrid, Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Madrid: Ministerio de Ciencia e Innovación. 253 p.

Pérez, I. (2019). Los incendios forestales que afectan a México. Universidad Nacional Autónoma de México. Consultado en diciembre de 2023. Disponible en <https://ciencia.unam.mx/leer/935/los-incendios-forestales-que-afectan-a-mexico#:~:text=Otro%20a%C3%B1o%20catastr%C3%B3fico%20fue%20el,600%20mil%20291%20hect%C3%A1reas%20da%C3%B1adas>.

Pereira-Morales, C., Maycotte-Morales, C., Elena-Restrepo, B., Mauro, F., Calle-Montes, A., Esther-Velarde, E. (2011). Sistemas agroforestales, primera edición. Caldas, Colombia.

Pérez-Martínez, M. A. (2011). Concentración de carbono en cuatro especies tropicales. [Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]. Hidalgo, México.

Pérez Martínez, R. V. (2011). Contenido de carbono en ecosistemas del cerro Tláloc, Texcoco, México. [Tesis de Maestría. Universidad autónoma de Chapingo]. Estado de México, México. Consultado en marzo de 2023. Disponible en <https://repositorio.chapingo.edu.mx/server/api/core/bitstreams/c9e92d5b-1328-4329-96fa-96702f28de6a/content>

Pérez, V. H. (2019). Identificación y caracterización del agroecosistema cafetalero en la comunidad de Ixtcatla, municipio de Ixhuatlán del café, Veracruz. [Tesis de Licenciatura. Universidad autónoma de Chapingo]. Estado de México, México. Consultado en abril de 2023. Disponible en <https://www.comerciojustomx.org/data/acervo/26/archivo-e98j.pdf>

Pimienta-de la Torre, D., Reyes-Reyes, J., Rodríguez-Morales, J., y Marroquín-Morales, P. (2019). Estimación de biomasa aérea total y contenido de carbono de *Pinus maximinoi* H. E. Moore en Las Margaritas, Chiapas, México. *Avances en investigación agropecuaria*. Vol. 23(2): 31-41. Consultado en mayo de 2023. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/357751490_Estimacion_de_biomasa_aerea_ttotal_y_contenido_de_carbono_de_Pinus_maximinoi_H_E_Moore_en_Las_Margaritas_Chiapas_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/357751490_Estimacion_de_biomasa_aerea_total_y_contenido_de_carbono_de_Pinus_maximinoi_H_E_Moore_en_Las_Margaritas_Chiapas_Mexico)

Pineda, M. (2007). Flujo de energía y cadenas tróficas. Servicios de publicaciones de la Universidad de Córdoba. España. p. 39-45.

Rajagopal, R. I. (2004). *Estimación del secuestro de carbono en sistemas agroforestales a base de cítricos en el trópico húmedo mexicano*. Universidad Autónoma Chapingo. Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. México.

Razo-Zárate, R., Gordillo-Martínez, A., Rodríguez-Laguna, R., Maycotte-Morales, C., y Acevedo-Sandoval, O. (2013). Estimación de biomasa y carbono almacenado en árboles de oyamel afectados por el fuego en el Parque nacional "El Chico", Hidalgo, México. *Madera y bosques*, 19(2), 73-86. Consultado en febrero de 2022. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712013000200005&lng=es&tlng=es.

Razo-Zárate, R., Gordillo-Martínez, A. J., Rodríguez-Laguna, R., Maycotte-Morales, C. C., y Acevedo-Sandoval, O. A. (2015). Coeficientes de carbono para arbustos y herbáceas del bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico. *Revista Mexicana de Ciencias*

Forestales, 6(31): 58-67. Consultado en abril de 2023. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322015000500005&lng=es&tlng=es.

Reyes Reyes, J., Rodríguez Morales, J. A., Pimienta de la Torre, D. de J., Fuentes Pérez, M. A., Marroquín Morales, P., Merino García, A., y Aguirre Medina, J. F. (2022). Diversidad y estructura de los árboles de sombra asociados a *Coffea arabica* L. en el Soconusco, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(71), 4–27. Disponible en <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1191>

Riesco M., G., Imaña E., J., & de Paula, J. E. (2019). Densidad de la madera de 59 especies del orden Sapindales procedentes de bosques naturales brasileños. *Madera y Bosques*, 25(2): e2521817. Disponible en Doi: 10.21829/myb.2019.2521817

Rodríguez A. R., A.M. Ramírez A., H. Palacios J., F.J. Fuentes T, J.A. Silva G y A.R. Saucedo C. (2015). Características anatómicas, físico-mecánicas y de maquinado de la madera de mezquite (*Prosopis velutina* Wooton). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6(28): 156-173.

Rodríguez-Laguna, R., Jiménez-Pérez, J., Ó. A. Aguirre-Calderón, O. y Treviño-Garza, E. (2006). Estimación del carbono almacenado en un bosque de niebla en Tamaulipas, México. *CIENCIA UANL / VOL. IX, No. 2*. Consultado en mayo de 2023. Disponible en <https://core.ac.uk/reader/76584850>

Rodríguez-Laguna R., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. y Jurado-Ibarra, E. (2007) Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en especies de encino y pino en Iturbide, N. L. *Ciencia Forestal en México* 32: 39-56. Consultado en julio de 2023. Disponible en <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/827/2064>

- Rodríguez-Laguna, R., Jiménez-Pérez, J., Meza-Rangel, J., Aguirre-Calderón, O. y Razo-Zarate, R. (2008). Carbono contenido en un bosque tropical subcaducifolio en la reserva de la biosfera el cielo, Tamaulipas, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4 (2): 215-222. Consultado en mayo de 2023. Disponible en https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/icap/LI_IntGenAmb/Rodri_Laguna/5.pdf
- Rojas Barrera, J. (2019). Almacenamiento de carbono aéreo y del suelo del bosque de oyamel del Parque Nacional “El Chico”, Estado de Hidalgo. [Tesis de Maestría. Universidad Veracruzana]. México. Consultado en mayo de 2023. Disponible en https://www.uv.mx/pozarica/mca/files/2019/05/G06_JANET-ROJAS-BARRERA.pdf
- Romero-Rangel, S., Aguilar-Rodríguez, S., Rojas-Zenteno, E. C. (2003). *Buddleja cordata* H.B.K. ssp. *cordata* (buddlejaceae): propagación y anatomía de la madera. *Polibotánica* Núm.16, pp.63-78, ISSN 1405-2768. Consultado en agosto de 2022. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/621/62101604.pdf>
- Roncal-García, S., Soto-Pinto, L., Castellanos-Albores, J., Ramírez-Marcial, N., y de Jong, B. (2008). Sistemas agroforestales y almacenamiento de carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México. *Interciencia*, 33(3): 200-206. Consultado en julio de 2023. Disponible en http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008000300009&lng=es&tlng=es.
- Ryan, M. G., Harmon, M. E., Birdsey, R. A., Giardina, C. P., Heath, L S., Houghton, R. A., Jackson, R. B., McKinley, D. C., Morrison, J. F., Murray, B. C., Pataki, D. E. y Skog, K. E. (2010). Síntesis del estado del conocimiento del ciclo de carbono en ecosistemas boscosos de los Estados Unidos. Informe 13. The Ecological Society of America. Disponible en https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_other/rmrs_2010_ryan_m002_esp.pdf
- Salgado-Mora, M.G., Ibarra-Núñez, G., Macías-Sámano, J.E., y López-Báez, O. (2007). Diversidad arbórea en cacaotales del Soconusco, Chiapas, México. *Interciencia (INCI)*,

32 (11): 763-768. Consultado en marzo de 2023. Disponible en http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442007001100009&lng=es&tlng=es.

Salgado-Mora, M.G., Ruiz-Bello, C., Moreno-Martínez, J. L., Irena-Martínez, B. y Aguirre-Medina, J.F. (2018). Captura de carbono en biomasa aérea de árboles de sombra asociados a *Coffea arabica* L. en el Soconusco Chiapas, México. *Revista Agroproductividad* 11 (2): 120-126. Consultado en mayo de 2023. Disponible en <https://core.ac.uk/download/pdf/249320006.pdf>

Sánchez, A. (2010). Leguminosas como potencial forrajero en la alimentación bovina. *Revista de difusión de tecnología agrícola y pesquera del FONAIAP*, vol. 4: 83-89.

Sánchez-Rodríguez, EV., López-Mata, L., García-Moya, E. y Cuevas-Guzmán, R. (2003). Estructura, composición florística y diversidad de especies leñosas de un bosque mesófilo de montaña en la Sierra de Manantlán, Jalisco. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 73: 17-34. Consultado en agosto de 2022. Disponible en <https://www.botanicalsciences.com.mx/index.php/botanicalSciences/article/download/1676/1325/>

Sandoval, M., Stolpe, N., Zagal, E., Mardones, M. y Montano, J. (2003). El secuestro de carbono en la agricultura y su importancia con el calentamiento global. *Theoria*. 12: 65-71.

Sarango-González, F. y Tenempaguay-Guncay, W. (2020). Estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea, necromasa (hojarasca) y en el suelo en un bosque de pino en la comuna Paquizhapa (provincia de Loja). [Tesis de Licenciatura. Universidad Politécnica Salesiana], Sede Cuenca, Ecuador. Consultado en junio de 2023. Disponible en <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19153/1/UPS-CT008822.pdf>

Saynes Santillán, V., Etchevers Barra, J. D., Paz Pellat, F. y Alvarado Cárdenas, L. O. (2016). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1): 83-96. Consultado en agosto de 2023. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000100083&lng=es&tlng=es

Schroeder, P. (1994). Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 27: 89–97.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2020). Cultivo de café en México. Consultado en julio de 2023. Disponible en <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cultivo-de-cafe-en-mexico>

Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2023). Atmósfera. Consultado en junio de 2021. Disponible en https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/05_atmosfera/cap5_2.html

Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera (SIAP). (2023). Escenario mensual de productos agroalimentarios. Consultado en julio de 2023. Disponible en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/807476/Cafe_Enero.pdf

Silva López. J. C. y Olaya Serrano. L. (2019). Cuantificación de carbono almacenado en un sistema agroforestal de café (*Coffea arabica* L.), asociado con guaba (*Inga edulis* sp.), distrito Jaén – Cajamarca. [Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de Jaén]. Perú.

Smith T. M., Cramer W. P., Dixon R. K., Leemans R., Neilson R. P. y A. M. Solomon. (1993). The global terrestrial carbon cycle. In: Wisniewski J. and R. N. Sampson (Eds). *Terrestrial biosphere carbon fluxes: quantification and sources of CO₂* Klumer Academic Publishers, Netherlands. pp. 19-37. Disponible en <https://doi.org/10.1007/BF01104986>

Solomon S., Qin D., Manning, M., Alley R.B., Berntsen T., Bindoff N.L., Chen Z., Chidthaisong A., Gregory J.M., Hegerl G.C., Heimann M., Hewitson B., Hoskins B.J., Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck F., Raga G., Ramaswamy V., Ren J., Rusticucci M., Somerville R., Stocker T.F., Whetton P., Wood R.A. y Wratt D. (2007). Technical Summary. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge y New York: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller ed. Pp, 25.

Somarriba, E. (1998). Diagnóstico y diseño agroforestal. CATIE, Turrialba (Costa Rica). Consultado en julio de 2022. Disponible en <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/6043>

Sotomayor, C. J., Herrera, F. M., & Cruz, L. J. (2003). Clasificación mecánica de la madera de 100 especies mexicanas [online]. Revisado en enero de 2022. Disponible en <http://www.fao.org/3/XII/1054-B4.htm>

Sotomayor, C. J. R. (2005). Características mecánicas y clasificación de la madera de 150 especies mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 1(1): 1-24. Consultado en agosto de 2022. Disponible en https://www.academia.edu/6528926/Caracter%C3%ADsticas_mec%C3%A1nicas_y_clasificaci%C3%B3n_de_150_especies_de_maderas_Mexicanas

Sotomayor C., J. R. (2015). Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich., México. 65 p. Consultado en enero de 2022. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/276841418_Banco_FITECMA_de_caracteristicas_fisico-mecanicas_de_maderas_Mexicanas

Soto-Pinto L., Romero Y.A., Caballero J.N., Segura G.W. (2001). Diversidad de plantas leñosas y estructura de cafetales de sombra en el norte de Chiapas, México. *Revista de*

Biología Tropical, 49 (3-4): 977-987. Consultado en mayo de 2023. Disponible en http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442001000300018&lng=en&tlng=en

Tlaxcala-Méndez, R., Pablo-Mendoza, M., Aquino-Ramírez, M., Santiago-Trinidad, O. y López-Vázquez, N. (2021). Cuantificación del almacén de biomasa y carbono aéreo en un cafetal bajo sombra diversificada. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental El Palmar. Tezonapa, Veracruz, México. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis 2021. Programa Mexicano del carbono. Consultado en mayo de 2023. Disponible en https://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/count.php?file=EACCIM_Sintesis_2021-22

Tlaxcala-Méndez, R., Aquino-Ramírez, M., Pablo-Mendoza, M. y Santiago-Trinidad, O. (2022). Almacén de carbono en sistemas agroforestales de café en la localidad de Xochiojca, Zongolica, Veracruz. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental El Palmar. Tezonapa, Veracruz, México. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis 2022. Programa Mexicano del carbono. Consultado en mayo de 2023. Disponible en https://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/count.php?file=Sintesis_2022

Torres Caballos, D. L. (2020). Estimación y clasificación de las propiedades mecánicas de 149 especies mexicanas de importancia industrial con métodos no destructivos. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Chapingo]. Consultado en agosto de 2022. Disponible en <https://repositorio.chapingo.edu.mx/server/api/core/bitstreams/076c9fde-7ba3-4bac-858e-3a7569bb9912/content>

Verdugo-Morales E. G., Alanís-Rodríguez, E., Cuellar-Rodríguez, G., Yerena-Yamallel, J. I., Alejandro Collantes-Chávez-Costa, A., y Silva-García, J. E. (2022). Composición,

estructura y diversidad arbórea en un gradiente altitudinal de un bosque mesófilo de montaña en la sierra madre de Chiapas, México.

Villalobos, F. y Pratt, L. (1999). Estimación del costo marginal de los servicios de fijación de carbono en Costa Rica. Centro Latinoamericano de Competitividad y Desarrollo Sustentable. 2-4 pp. Consultado en octubre de 2021. Disponible en http://sanchoconsulting.com/wp-content/uploads/2016/04/Costo_servicios-fijaci%C3%B3n_Costa_Rica.pdf

Vizcaino-Bravo, M. Q. (2017). Biodiversidad Arbórea y Contenido de Carbono Aéreo en Diversos Usos del Suelo en la Región del Bosque de Niebla en el Centro de Veracruz, México. [Tesis de maestría, Universidad Veracruzana]. México. Consultado en agosto de 2022. Disponible en <https://www.uv.mx/mcef/files/2019/04/Vizcaino-BMQ-Biodiversidad-arborea-y-Contenido-de-Carbono-Aereo-en-Diversos-Usos-del-Suelo-en-la-Region-del-Bosque-de-Niebla-en-el-Centro-de-Veracruz-Mexico.pdf>

Williamson, G. B., y Wiemann, M. C. (2010). Measuring wood specific gravity correctly. *American Journal of Botany*, 97(3): 519-524. Disponible en doi:10.3732/ajb.0900243

Zaninovich, S. C. (2017). Dinámica y almacenamiento del carbono en la necromasa y el suelo de ecosistemas forestales: efecto de la degradación del bosque nativo y su reemplazo por plantaciones de *Pinus taeda* L. en el NE de Argentina. [Tesis doctoral. Universidad Nacional del Nordeste]. Consultado en septiembre de 2021. Disponible en <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/84021>

Zelada Fonseca, C. (2012). Determinación del poder calórico de especies forestales utilizadas como sombra de café en la cuenca alta y media del Río Reventazón, Cartago, Costa Rica. [Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Cartago, Costa Rica.

Consultado en enero de 2022. Disponible en

https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/2922/Informe_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y