



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**



CAMPUS V

**CAPTURA DE CARBONO Y LA RELACIÓN CARBONO - FÓSFORO
EN GRADIENTES DE ELEVACIÓN EN LA CUENCA DE ABASTO
SELVA ZOQUE, CHIAPAS.**

TESIS

Qué para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA
TROPICAL**

Por

César Noé Tondopó Marroquín PS1558

Director de Tesis

Dr. Deb Raj Aryal

Villaflores, Chiapas, febrero 2021



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS, CAMPUS V.
DIRECCIÓN**



Villaflores, Chiapas
18 de febrero de 2021
Oficio N° D/0047/21

C. CÉSAR NOÉ TONDOPÓ MARROQUÍN
MAESTRANTE EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL
DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS CAMPUS V
P R E S E N T E.

En atención a que usted ha presentado los votos aprobatorios del Honorable Jurado, designado para su evaluación de posgrado, de la tesis titulada: **“CAPTURA DE CARBONO Y LA RELACIÓN CARBONO - FÓSFORO EN GRADIENTES DE ELEVACIÓN EN LA CUENCA DE ABASTO SELVA ZOQUE, CHIAPAS”**, por este conducto le comunico que se le autoriza la impresión del documento, de acuerdo a los lineamientos vigentes de la Universidad.

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE
“POR LA CONCIENCIA DE LA NECESIDAD DE SERVIR”

M. C. CARLOS ALBERTO VELÁZQUEZ SANABRIA
ENCARGADO DE LA DIRECCIÓN

FACULTAD DE
CIENCIAS AGRONÓMICAS



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DIRECCIÓN

C. c. p. Archivo

CAVS*MARH.



Código: FO-113-09-05

Revisión: 0

CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS DE TÍTULO Y/O GRADO.

El (la) suscrito (a) César Noé Tondopó Marroquín, Autor (a) de la tesis bajo el título de “CAPTURA DE CARBONO Y LA RELACIÓN CARBONO – FÓSFORO EN GRADIENTES DE ELEVACIÓN EN LA CUENCA DE ABASTO SELVA ZOQUE, CHIAPAS.,” presentada y aprobada en el año 2021 como requisito para obtener el título o grado de Maestro en ciencias en producción agropecuaria tropical, autorizo a la Dirección del Sistema de Bibliotecas Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH), a que realice la difusión de la creación intelectual mencionada, con fines académicos para que contribuya a la divulgación del conocimiento científico, tecnológico y de innovación que se produce en la Universidad, mediante la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Consulta del trabajo de título o de grado a través de la Biblioteca Digital de Tesis (BIDITE) del Sistema de Bibliotecas de la Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH) que incluye tesis de pregrado de todos los programas educativos de la Universidad, así como de los posgrados no registrados ni reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT.
- En el caso de tratarse de tesis de maestría y/o doctorado de programas educativos que sí se encuentren registrados y reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), podrán consultarse en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Chiapas (RIUNACH).

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a los 22 días del mes de marzo del año 2021.

César Noé Tondopó Marroquín
Nombre y firma del Tesista o Tesistas



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

CAMPUS V



Esta tesis titulada **Captura de carbono y la relación carbono - fósforo en gradientes de elevación en la Cuenca de Abasto Selva Zoque, Chiapas**.se incluye en la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento: **TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN EN LOS SISTEMAS TRADICIONALES Y ALTERNATIVOS DE PRODUCCIÓN SUSTENTABLE**, del programa de Maestría en Ciencias en Producción Agropecuaria Tropical.



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
CAMPUS V**



Esta tesis titulada " **CAPTURA DE CARBONO Y LA RELACIÓN CARBONO-FÓSFORO EN GRADIENTES DE ELEVACIÓN EN LA CUENCA DE ABASTO SELVA ZOQUE, CHIAPAS**" , fue realizado por el **ING. César Noé Tondopó Marroquín**, bajo la dirección y asesoría del comité tutorial indicado, como requisito parcial para obtener el grado de **Maestro en Ciencias en Producción Agropecuaria Tropical**.

COMITÉ TUTORIAL

Director

Dr. Deb Raj Aryal

Codirector

Dr. Marcos Casiano Domínguez

Asesores

Dr. José Apolonio Venegas Venegas

M.C. Noé Samuel León Martínez

Villaflores, Chiapas, México, febrero 2021

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad de esta grandiosa experiencia, por las personas que puso en el camino para aportar de su valioso tiempo en el trabajo, por ese ánimo de caminar largos caminos y llegar sanos a casa.

Gracias a mis padres por ser un apoyo incondicional en todo tiempo, gracias a mi hermano Mauricio, a Jenni, a Pacifico y Valentín por acompañarme e invertir de su valioso tiempo y esfuerzo para llevar a cabo la investigación. Gracias a las personas de la comunidad que me compartieron un espacio en sus hogares durante el periodo de trabajo en campo. Agradezco al Dr. Deb Raj Aryal por enseñarme el valor de la ciencia, así mismo agradezco a su familia por la atención en su hogar. A Dr. Marcos Casiano Domínguez, Dr. José Apolonio Venegas Venegas y M.C Noé Samuel León Martínez por brindarme sus consejos y asesoría durante esta investigación.

Gracias a la Maestría en Ciencias en Producción Agropecuaria Tropical (MCPAT) por permitir y a la Facultad de Ciencias Agronómicas (FCA) de la UNACH por permitirme realizar mis estudios en sus instalaciones y a todos los profesores que me brindaron de sus conocimientos y experiencias tan valiosas para mi formación. A Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca para estudiar la maestría. Un agradecimiento al Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación (ICTI) del Gobierno del estado de Chiapas por el recurso económico otorgado a Dr. Deb Raj Aryal (director de esta tesis) como apoyos únicos para fortalecer actividades científicas de los integrantes del sistema estatal de investigadores (SEI 2020/268). Un agradecimiento a Cecropia soluciones locales y retos globales por la vinculación con los grupos de silvicultores del área de estudio. Agradezco a todos los habitantes de la zona de estudio que me permitieron realizar este estudio en su comunidad.

Así mismo, se agradece al proyecto BioPaSOS implementado en México por CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) de Costa Rica con el apoyo de la Iniciativa Climática Internacional (IKI) y el Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania por apoyar en trabajo de Campo y laboratorio de esta investigación.

Se agradece al laboratorio de Nutrición Animal de la Facultad de Ciencias Agronómicas, Villaflores, Chiapas y al laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental del Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México por las facilidades en los análisis químicos de muestras de suelo y biomasa.

Se agradece al cuerpo académico consolidado de agroforestería pecuaria por brindar las oportunidades de realizar la tesis bajo su línea de investigación.

CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general.....	3
1.2. Objetivos específicos	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Cambio climático.....	3
2.2. Gases de efecto invernadero	4
2.3. Captura de carbono como una estrategia de mitigación de GEI.....	7
2.4. Carbono orgánico del suelo	7
2.5. Importancia del fósforo en la captura de carbono	8
2.6. Bosques y sus ciclos de nutrientes	9
2.7. El fósforo en los bosques.....	9
3. MATERIALES Y MÉTODOS	10
3.1. Área de estudio.....	10
3.2. Método de muestreo	13
3.3. Biomasa aérea.....	14
3.4. Biomasa de raíces	15
3.5. Madera muerta.....	16
3.6. Hojarasca, Mantillo y Capa de fermentación.....	17
3.7. Muestreo de suelo	19
3.8. Análisis del contenido de carbono en laboratorio.....	19
3.9. La tasa de acumulación de carbono	20
3.10. pH y potencial redox (Eh) del suelo	21
3.11. Análisis de fósforo.....	21
3.12. Análisis de datos.....	21
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
4.1. Resultados	22
4.1.1. Carbono almacenado en biomasa arbórea	22

4.1.2.	Carbono en hojarasca, mantillo y capa de fermentación.....	24
4.1.3.	Carbono en madera muerta	25
4.1.4.	Carbono orgánico del suelo.....	26
4.1.5.	Carbono total.....	27
4.1.6.	Propiedades de suelo.....	28
4.1.7.	Fósforo en el suelo y la relación carbono fósforo	29
4.1.8.	Relación entre variables múltiples	30
4.1.9.	Tasa de captura de carbono.....	32
4.2.	DISCUSIÓN	35
4.2.1.	Carbono en biomasa arbórea a diferentes elevaciones	35
4.2.2.	Carbono en hojarasca	36
4.2.3.	Carbono en madera muerta	37
4.2.4.	Carbono orgánico del suelo.....	37
4.2.5.	Relación carbono fósforo.....	38
5.	CONCLUSIONES.....	40
6.	LITERATURA CITADA	41

ÍNDICE DE CUADROS

Página

Cuadro 1: Especies dominantes del ejido Corazón del Valle.....	10
Cuadro 2. Cantidad de carbono almacenado (Mg C ha^{-1}) in biomasa área (CBA), biomasa de raíces (CBR) y biomasa viva total ($\text{CBTot} = \text{BA} + \text{BR}$) entre tres diferentes gradientes de elevación en la Cuenca de Selva Zoque de Chiapas. Los valores son las media y respectivos 95% intervalos de confianza. Mismas letras seguidas por la media indican que no hay diferencias significativas (Tukey $p > 0.05$).	19
Cuadro 3. Cantidad de carbono almacenado en biomasa arbórea como efecto del manejo forestal y actividad ganadera. CON (sitios con manejo), SIN (Sitios sin manejo), C BA (Carbono en biomasa aérea) $F(1, 20) = 0.51$, $p = 0.482$. IC es intervalo de confianza.....	20
Cuadro 4. Cantidad de carbono almacenado (Mg C ha^{-1}) en tres diferentes capas de hojarasca entre los gradientes de elevación del bosque de pino en la cuenca de Selva Zoque, Chiapas. IC es intervalo de confianza.	21
Cuadro 5. Toneladas de carbono en hojarasca en sitios con manejo y sitios sin manejo. IC es intervalo de confianza.....	22
Cuadro 6. La cantidad media carbono orgánico de suelo (COS %) en los sitios de muestreo con diferentes edades de vegetación. IC es intervalo de confianza.	23
Cuadro 7: Contenido (%) y almacén (Mg ha^{-1}) de carbono orgánico de suelo comparado entre los gradientes de elevación. IC es intervalo de confianza. ..	24
Cuadro 8. La cantidad de carbono total en toneladas de carbono por hectárea por el gradiente de elevación (Mg C ha^{-1}). $F(2, 19) = 0.873$, $p = 0.434$. IC es intervalo de confianza.....	24
Cuadro 9. Las propiedades de suelo en los sitios de muestreo por el gradiente de elevación	25
Cuadro 10. Concentración de fósforo disponible (ppm) con la técnica de Bray 1 entre diferentes gradientes de elevación estudiados.....	26
Cuadro 11. Relación carbono fósforo a diferentes gradientes de elevación.	27
Cuadro 12. Componentes principales y las varianzas explicadas por cada componente derivado de análisis multivariados.....	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1. Forzamiento radiativo ($W m^{-2}$) medio mundial y su intervalo de probabilidad de un 90% en 2005 para varios agentes y mecanismos. Forzamiento positivo (color rojo) causa cambio climático y el forzamiento negativo (color azul) mitiga el cambio climático.	4
Figura 2. Mediciones de carbono atmosférico mundial entre 1960 y 2020 (arriba: concentración de CO_2 y abajo: la tasa de crecimiento anual) por el observatorio de Mauna Loa Hawai, enero de 2021.	6
Figura 3. Mapa del área de estudio y sitios de muestreo.	11
Figura 4. Área de muestreo por parcelas anidadas.	13
Figura 5. Medición de diámetro a la altura del pecho (DAP).	14
Figura 6. Ángulos considerados para determinar la altura del árbol con el uso del clinómetro.	15
Figura 7. Transectos para el levantamiento de combustible mediante el método de intersección planar de Van Wagner.	16
Figura 8. Levantamiento de capas de materia orgánica del suelo.	18
Figura 9. Curva patrón de la calibración del espectrofotómetro.	20
Figura 10. Cambio en la cantidad de carbono en biomasa arbórea ($Mg C ha^{-1}$) con la edad después de aclareo (aprovechamiento forestal).	23
Figura 11. Cantidad de carbono almacenado en madera muerta por la categoría de edad forestal (después de aprovechamiento $F(7, 14) = 2.965, p = 0.0397$ (LSD).	26
Figura 12. Relación entre carbono orgánico de suelo (COS %) y potencial redox (mV)	29
Figura 13. Relación entre múltiples variables generado por un análisis de componentes principales. El componente un en eje X explica 30.7% de varianza mientras el componente dos en eje Y explica 17.7% de varianza total.	32
Figura 14. La relación entre edad forestal y la tasa de acumulación de carbono en biomasa aérea en ecosistemas forestales del estudio.	33
Figura 15. La relación entre edad forestal y la tasa de acumulación de carbono total en ecosistemas forestales del estudio. A) Calculo de la tasa incluyendo toda la cantidad de carbono orgánico de suelo (COS); B) Calculo de la tasa restando 104 Mg de COS como línea base o stock original en el suelo sin intervención.	34

RESUMEN

Los ecosistemas forestales tienen alta capacidad de fijar y almacenar el carbono atmosférico, sin embargo, estos ecosistemas han sido afectados seriamente por la extracción, mal manejo y cambio a otros usos de suelo. El estado de Chiapas en México se caracteriza por tener diversidad de microrregiones, entre ellos se encuentran los ecosistemas de bosque templado donde su principal vegetación es pino y encino, los cuales están sufriendo degradación y agotamiento de nutrientes de suelo. En ese sentido el objetivo de esta investigación fue evaluar la relación carbono fósforo del suelo y la captura de carbono en diferentes gradientes de elevación en la cuenca de abasto selva Zoque Chiapas. Se realizaron muestreos de carbono en biomasa y suelo en 22 sitios en tres gradientes de elevación en el municipio de Cintalapa Chiapas. Se colectaron la información sobre el manejo y la edad de vegetación en cada uno de los sitios. En cada sitio se levantó las muestras de biomasa aérea, madera muerta, hojarasca y suelo. El carbono orgánico del suelo se analizó mediante la digestión química seguida de lectura espectrofotométrica calibrada con sacarosa. Los valores medios de carbono en biomasa área variaron entre 49.9 y 104.2 ± 9.7 Mg C ha⁻¹, estos resultados no presentaron diferencia significativa entre los diferentes gradientes de elevación. La tasa media de acumulación de carbono en biomasa aérea vario entre 0.5 y 2.9 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, mientras la tasa media de acumulación de carbono total del ecosistema vario entre 0.9 y 11.1 Mg C ha⁻¹ año⁻¹. La cantidad de carbono en hojarasca (la capa fresca) vario entre 1.27 y 1.35 Mg C ha⁻¹, mientras el mantillo (la capa fragmenta) vario entre 2.73 y 4.27 Mg C ha⁻¹. La cantidad media de carbono en madera muerta vario entre 4.4 a 8.3 Mg C ha⁻¹ dependiendo de la edad de vegetación después de aprovechamiento forestal. Los resultados de las concentraciones de fósforo en el suelo de este estudio 2.75 y 4.06 mg P kg⁻¹ son inferiores al promedio nacional de 14.1 a 70.5 mg P kg⁻¹. La relación carbono: fósforo (C:P) de suelo vario significativamente entre diferentes gradientes de elevación, siendo los sitios de mayor altitud con mayor relación C:P. Se demostró en este estudio que la elevación únicamente no puede explicar significativamente los patrones de almacenamiento de carbono, sino que múltiples variables como la elevación, propiedades de suelo,

manejo y la edad de vegetación en conjunto explican la variación de la cantidad total de carbono almacenado en estos ecosistemas forestales.

Palabras claves: Captura de carbono, biomasa arbórea, carbono orgánico del suelo, fósforo disponible, bosque de Pino, manejo forestal

ABSTRACT

Forest ecosystems have a high capacity to capture and store atmospheric carbon in their biomass and soils, however, these ecosystems have been seriously affected by extraction, mismanagement and change to other land uses. The state of Chiapas in Mexico is characterized by having a diversity of micro-regions, among them are the temperate forest ecosystems where its main vegetation is pine and oak, which are suffering degradation and depletion of soil nutrients. In this sense, the objective of this research was to evaluate the soil carbon phosphorus relationship and carbon sequestration at different elevation gradients in the Selva Zoque watershed in Chiapas. Biomass and soil carbon samplings were carried out in 22 sites in three elevation gradients in the municipality of Cintalapa, Chiapas. Information on management and vegetation age was collected at each site. At each site, samples of aboveground biomass (AGB), dead wood, litter and soil were collected. Soil organic carbon was analyzed by chemical digestion followed by sucrose calibrated spectrophotometric reading. The mean values of carbon in AGB varied between 49.9 and $104.2 \pm 9.7 \text{ Mg C ha}^{-1}$, these results did not present significant differences between different elevation gradients. The average carbon accumulation rate in AGB varied between 0.5 and $2.9 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, while the average rate of total carbon accumulation of the ecosystem varied between 0.9 and $11.1 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$. The amount of carbon in fresh litter (dry and fragmented) varied between 1.27 and $1.35 \text{ Mg C ha}^{-1}$, while the humus (litter in decomposition) varied between 2.73 and $4.27 \text{ Mg C ha}^{-1}$. The average amount of carbon in dead wood varied between 4.4 to 8.3 Mg C ha^{-1} depending on the age of vegetation after logging. The results of the phosphorus concentrations in the soil of this study (2.75 and $4.06 \text{ mg P kg}^{-1}$) are lower than the

national average of 14.1 to 70.5 mg P kg⁻¹. The carbon: phosphorus (C: P) ratio of the soil varied significantly between different elevation gradients, with the highest altitude sites having a higher C: P ratio. It was demonstrated in this study that elevation alone cannot significantly explain carbon storage patterns, but the multiple variables such as elevation, soil properties, management and vegetation age together explain the variation in the total amount of carbon stored in these forest ecosystems.

Keywords: Carbon sequestration, tree biomass, soil organic carbon, available phosphorus, pine forest, forest management

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de los procesos y patrones del almacenamiento de carbono en la biosfera terrestre podría ayudar a comprender el intercambio de CO₂ entre la biósfera y la atmósfera (Le Quéré *et al.*, 2018). Para el mes de octubre del 2020 las concentraciones mundiales de CO₂ en la atmósfera fueron de 411.5 ppm (NOAA, 2020), dicha cantidad presenta un comportamiento ascendente debido a las actividades diarias a nivel global.

México en el mundo se encuentra dentro de los 20 países con mayores emisiones de CO₂ (GCA, 2017). México es un país muy diverso en flora, fauna, microclimas y terrenos con diversas características topográficas y edafológicas, en el cual la presión por las actividades que se realizan durante la producción y extracción degrada principalmente los suelos alterando los ciclos de los nutrientes, entre ellos principalmente el ciclo del carbono.

El carbono es un elemento fundamental de los compuestos orgánicos que se combina con el nitrógeno, fósforo, azufre, oxígeno e hidrógeno para constituir las moléculas más importantes para la vida (Jaramillo, 2004). De los diferentes reservorios de carbono que existen, se encuentra el carbono orgánico del suelo como parte fundamental del ciclo global del carbono, en este sentido los suelos resaltan su enorme potencial de secuestro de CO₂ en forma de biomasa (Hontoria *et al.*, 2004). Escudero y Mediavilla (2003), mencionan que el movimiento de los nutrientes en las plantas se ve condicionado por el aumento de las concentraciones de CO₂.

Además de la acumulación de carbono como una estrategia de mitigación de gases efecto invernadero, el carbono orgánico del suelo (COS) está vinculada principalmente con la cantidad de otros nutrientes y su disponibilidad. Por ejemplo en las zonas de suelos ácidos (como a región Frailesca de Chiapas, México), el aumento de COS puede mejorar el pH, que sea más cercano a la neutralidad aumentando la solubilidad de los nutrientes como fósforo (Martínez *et al.*, 2012).

El fósforo es después del nitrógeno el elemento que más influye en la reproducción, desarrollo, y la productividad de las plantas (Aguilar, 2016). El fósforo es un recurso

limitado que controla significativamente la productividad de cualquier sistema de producción, por lo tanto, la capacidad de captura de carbono se ve afectada (Elser *et al.*, 2007). Dicho paradigma es respaldado por la teoría biogeoquímica, la cual sostiene que el agotamiento de fósforo durante la pedogénesis a largo plazo limita la productividad en los suelos fuertemente degradados (Tuner *et al.*, 2018).

Gómez *et al* (2008) y Aryal *et al.* (2018) mencionan que los trabajos realizados en México demuestran una baja cantidad de fósforo disponible en suelos mexicanos, especialmente en los trópicos. La poca disponibilidad de este elemento puede afectar significativamente el potencial de captura de carbono en ecosistemas no manejados (forestales y praderas), donde no se aplica fertilizantes sintéticos. Así mismo, la conservación de carbono en suelos bajo prácticas de conservación pueden aumentar considerablemente el carbono orgánico de los suelos, beneficiando al suelo en su resistencia ante el impacto de la lluvia, mejora la tasa de infiltración, la cantidad de agua disponible, incrementa el contenido de la biomasa microbiana, disminuye la erosión y mitiga la emisión de gases de efecto invernadero (Cotler y Etchevers, 2016).

Los modelos utilizados en el ciclo de carbono para hacer proyecciones climáticas simulan un fuerte aumento en la productividad primaria neta debido al incremento de CO₂ en el siglo XXI, estos estudios no integran al nitrógeno y fósforo como los nutrientes principales que limitan o aumentan el crecimiento en las plantas según su disponibilidad, así como también el recambio en el uso del suelo. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar la relación carbono fósforo (C:P) del suelo y la captura de carbono en diferentes gradientes de elevación en selvas de la cuenca de abasto selva zoque de Chiapas. Se considera que la elevación puede ser un factor importante que podría explicar la variación de la captura y almacenamiento de carbono en la biomasa viva, materia muerta y suelo en los bosques debido a las diferentes condiciones climáticas y edáficas para el desarrollo de las plantas y actividades de descomposición de materia orgánica del suelo.

1.1. Objetivo general

Evaluar la relación carbono fósforo del suelo y la captura de carbono en diferentes gradientes de elevación en tres ejidos de la cuenca de abasto selva Zoque de Chiapas.

1.2. Objetivos específicos

- a) Cuantificar la cantidad de carbono en biomasa aérea, biomasa subterránea, hojarasca, mantillo, madera muerta y suelo en los diferentes gradientes de elevación.
- b) Cuantificar el contenido de fósforo disponible en el suelo en los diferentes gradientes de elevación.
- c) Explorar las relaciones entre el almacenamiento de carbono y fósforo disponible del suelo y otras variables como edad, manejo y propiedades de suelo.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Cambio climático

Las variabilidades en el clima en el planeta tierra son normalmente causadas por procesos naturales. Sin embargo, en las últimas décadas los cambios drásticos que actualmente se registran son causados por procesos antropogénicos (Benito, 2016). Los patrones normales de las variables de clima como temperatura, precipitación etc. se ha cambiado principalmente por la alteración de forzamiento radiactivo o imbalance (diferencia entre entrada y salida) de energía (UFCCC, 2007, Figura 1). El cambio drástico en el forzamiento radiactivo actual es el resultado de aumento de gases de efecto invernadero en la atmósfera (Change-IPCC, 2013).

FORZAMIENTO RADIATIVO PROMEDIO MUNDIAL

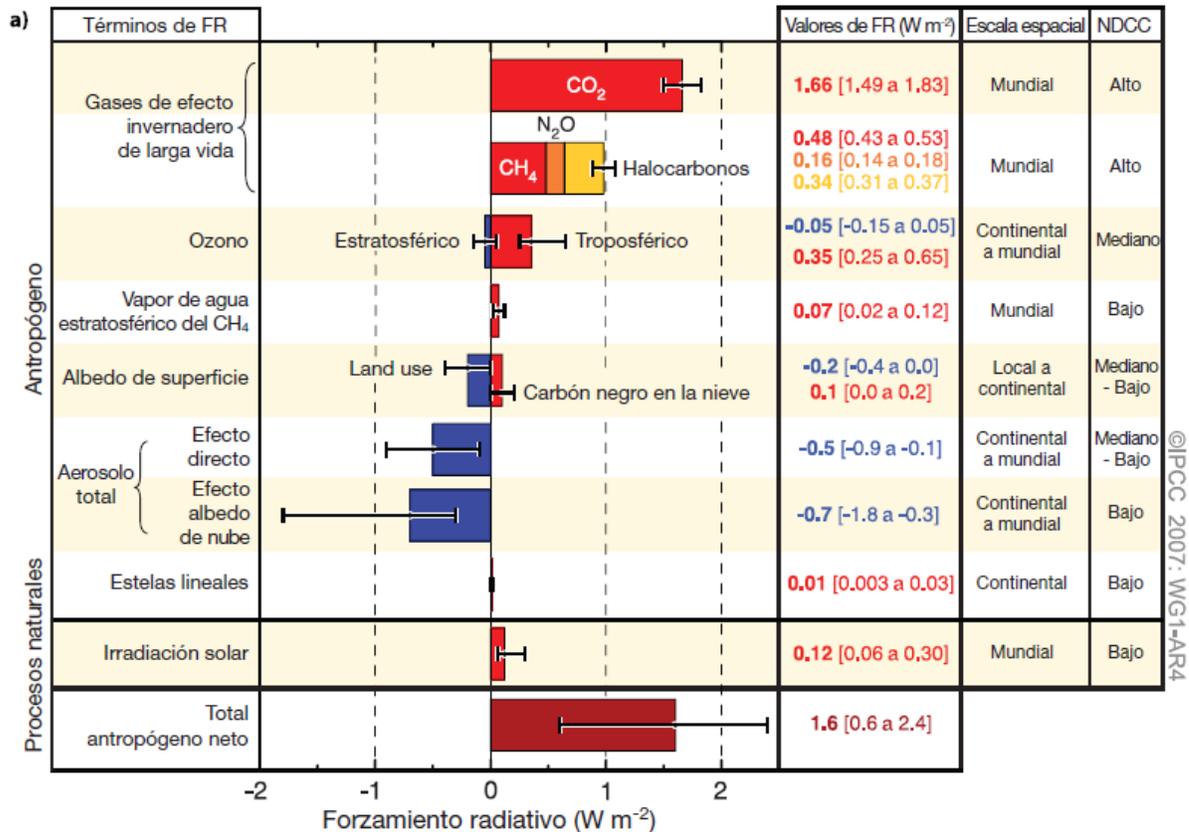


Figura 1. Forzamiento radiativo ($W m^{-2}$) medio mundial y su intervalo de probabilidad de un 90% en 2005 para varios agentes y mecanismos. Forzamiento positivo (color rojo) causa cambio climático y el forzamiento negativo (color azul) mitiga el cambio climático. Fuente: IPCC (2007).

2.2. Gases de efecto invernadero

El IPCC define a los gases de efecto invernadero (GEI) como el componente gaseoso de la atmósfera, ya sea de origen natural o antropogénico, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja térmica emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes. Aumento de la concentración de estos gases causan el aumento en la temperatura promedio del planeta o calentamiento global (Change-IPCC, 2013). Las emisiones GEI provienen por la combustión de hidrocarburos, producción de energía, incendios forestales, tala de bosques, desertificación, uso de productos químicos en la agricultura y la ganadería entre otras. Uno de los principales gases de efecto

invernadero es el dióxido de carbono (CO_2), que ha aumentado drásticamente en los años recientes, lo cual se ha demostrado por las mediciones continuas (Figura 2).

Las actividades humanas tales como el uso de combustibles fósiles para la producción de energía y los procesos derivados de actividades productivas están generando gases de efecto invernadero, entre estos gases se encuentra el dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) clorofluorocarbonos (CFC'S), óxido de nitrógeno (NO_2) y metano (CH_4).

Siendo principalmente el CO_2 uno de los gases de efecto invernadero más importantes por las grandes cantidades que se emiten (Ordoñez *et al.*, 2001). Para el mes de octubre del 2020, las concentraciones de CO_2 fueron de 411.5 ppm (Figura 2). Actualmente se ha descrito al CO_2 , CH_4 y N_2O como gases con efecto invernadero que perduran por mayor tiempo en la atmosfera por tener una composición química más estable, esto les permite estar más tiempo en la atmósfera (IPCC, 2018). A pesar del surgimiento de políticas públicas, el aumento de gases aumenta sin precedentes, los países que más emiten gases de efecto invernadero son Estados Unidos, China y la India, entre el periodo 2009-2018 las emisiones corresponden 42% de CO_2 fósiles, 34% de petróleo, 19% de gas natural y el 5% restante de cemento y otras fuentes pequeñas (Peters, 2019).

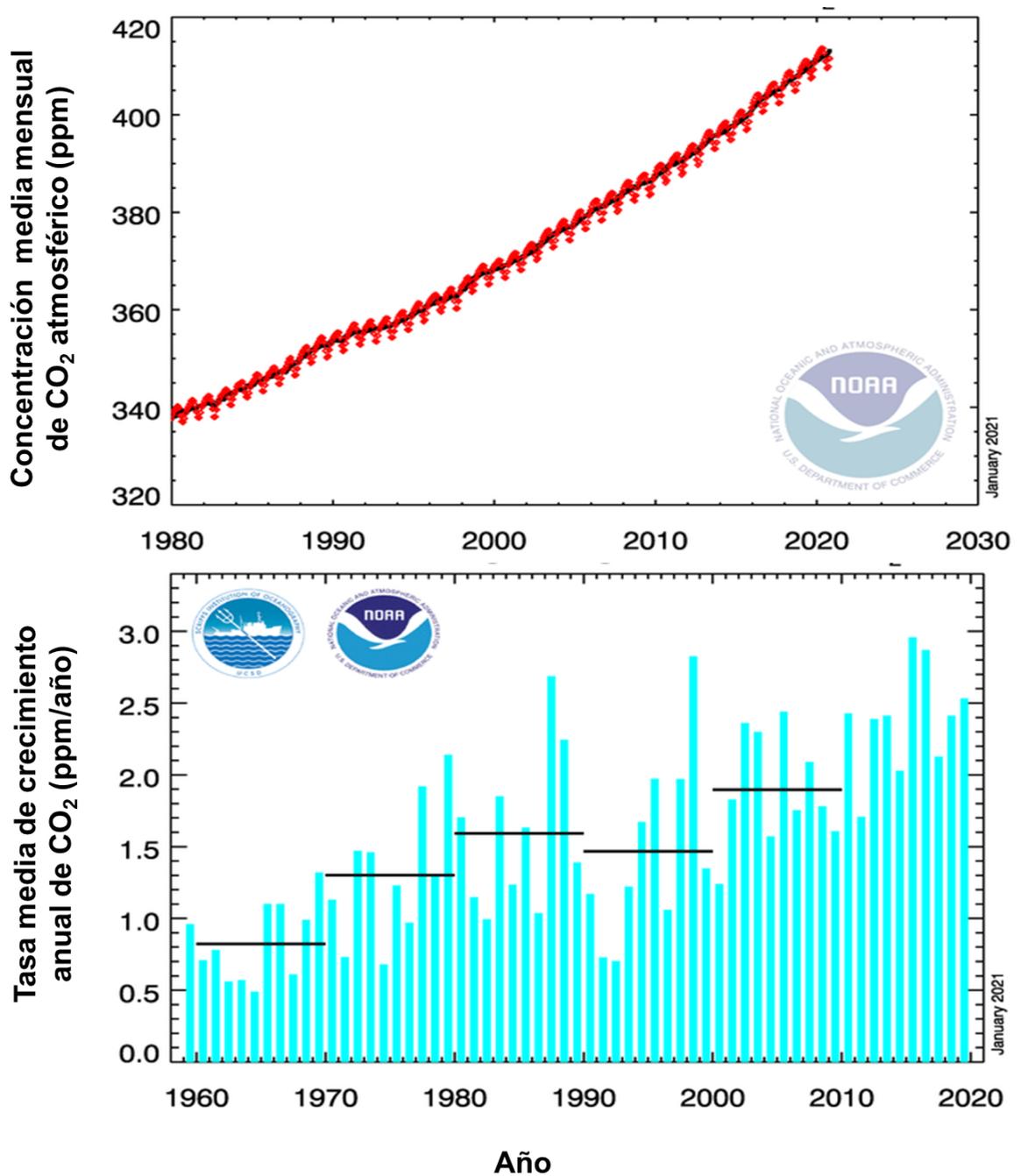


Figura 2. Mediciones de carbono atmosférico mundial entre 1960 y 2020 (arriba: concentración de CO₂ y abajo: la tasa de crecimiento anual) por el observatorio de Mauna Loa Hawai, enero de 2021.

2.3. Captura de carbono como una estrategia de mitigación de GEI

Los ecosistemas terrestres y marinos absorben el dióxido de carbono (CO₂) atmosférico a través de la fotosíntesis y almacenan en biomasa de plantas, plancton, sedimentos y suelos. Este proceso de fijación de carbono atmosférico se le conoce como secuestro de carbono. La cantidad de carbono que se encuentra en un reservorio o depósito se le conoce como el almacenamiento (stock) de carbono y cantidad anual de fijación de dióxido de carbono es la cantidad de mitigación. La fijación de carbono atmosférico y almacenamiento en la biomasa vegetal y suelo se ha considerado como una estrategia viable para la mitigación de cambio climático. El secuestro de carbono en tierras forestales puede contribuir significativamente para mitigar las concentraciones de CO₂ atmosférico y restaurar el servicio del ecosistema (Aryal *et al.*, 2019). Sin embargo, las tierras forestales se han reducido drásticamente en las últimas décadas por la expansión de tierras agropecuarias y otros usos (Houghton y Nassikas, 2017; Morales-Ruiz *et al.*, 2021). Además, la conversión de un sistema forestal a otros usos puede perder grandes cantidades de carbono orgánico almacenado en el suelo (Aryal *et al.*, 2018). Aumentar la tasa de acumulación, prolongar el tiempo de retención y reducir las emisiones de carbono de tierras forestales contribuye positivamente en la mitigación de CO₂ atmosférico. Sin embargo, es importante entender los procesos y factores que determinan la acumulación y almacenamiento de carbono en ecosistemas forestales. El manejo, la edad, disponibilidad de elementos nutrimentales y condiciones ecológicas pueden afectar la acumulación de carbono en estos ecosistemas (Aryal *et al.*, 2014; Casiano-Domínguez *et al.*, 2018).

2.4. Carbono orgánico del suelo

Los suelos se originan a partir de la roca madre, la incorporación de la materia orgánica y de componentes químicos con la influencia del clima y microorganismos descomponedores que existen en cada lugar fijando así grandes cantidades de carbono, convirtiendo al suelo en uno de los más grandes reservorios de carbono (Kramer y Chadwick, 2018). El carbono orgánico del suelo es un componente importante del ciclo global del carbono, los suelos resaltan un enorme potencial en el secuestro de CO₂ en forma de materia orgánica (Hontoria *et al.*, 2004). Los modelos

utilizados en el ciclo de carbono para hacer proyecciones climáticas simulan un fuerte aumento en la productividad primaria neta debido al incremento de CO₂ en el siglo XXI, estos estudios no integran al nitrógeno y fósforo como los nutrientes principales que limitan o aumentan el crecimiento en las plantas según su disponibilidad, así como también el recambio en el uso del suelo.

2.5. Importancia del fósforo en la captura de carbono

El fósforo es después del nitrógeno el elemento que más influye en el desarrollo y la productividad de las plantas (Aguilar, 2016). Es un elemento esencial escaso en muchos suelos, que puede limitar la producción de biomasa y su incorporación en el suelo. Se han realizado estudios que resaltan la importancia del fósforo en el cuerpo humano, animales, planta, así como en la biosfera en general porque se requiere en la formación de ácidos nucleicos, proteínas polímeros de carbohidratos y transporte de nutrientes a través de las células de las plantas. En ese sentido, Fernández (2007) menciona que el fósforo es un elemento que puede limitar la producción cuando se encuentra poco disponible en los ecosistemas, sin embargo la cuantificación del fósforo sigue siendo un desafío (Goll *et al.*, 2012).

Estudios en los países en desarrollo demuestran que la implementación de sistemas para recuperar nutrientes de las aguas residuales es un desafío, a pesar de ser prácticas que permiten reusar el agua también se puede obtener nutrientes logrando reducir los costos ambientales por la producción de fertilizantes sintéticos. Al lograr este tipo de producción países enteros no dependerán de la importación de fertilizantes fosfatados como ahora dependen de Marruecos o China principalmente, debido a que estos países tienen aproximadamente el 80% de las reservas de fósforo en el mundo (Cardoso *et al.*, 2019). El uso de fósforo en fertilizantes para la agricultura es altamente demandado al igual que el uso del nitrógeno, a diferencia de que las reservas de nitrógeno se encuentran en la atmósfera, el fósforo es un recurso finito que se encuentra en la rocas minerales, debido al incremento en la demanda por suelos deficientes en este elemento las reservas pueden agotarse en poco tiempo (Dawson, 2011). En México, no se ha estudiado el fósforo con mayor detenimiento en sus diferentes ecosistemas y sistemas de producción, los trabajos

realizados demuestran que los suelos mexicanos en promedio contienen 14.1 ± 1.3 a 70.5 ± 11.5 mg P kg⁻¹ (Aryal *et al.*, 2018).

2.6. Bosques y sus ciclos de nutrientes

Naturalmente los bosques tropicales tienen la capacidad alta para capturar grandes cantidades de carbono, pero la deforestación extensa y continua impide los cambios naturales y reduce la superficie y su potencial de captura de carbono. Además, se ha encontrado el 62% del total de los bosques tropicales en el mundo no es capaz de facilitar los cambios de rangos ante los cambios del clima, por lo tanto es importante priorizar la conservación de los bosques para tener corredores que permitan este tipo de mecanismos naturales (Senior *et al.*, 2019).

La descomposición de la hojarasca en los bosques es un proceso fundamental para los ciclos de los nutrientes porque se incorpora materia orgánica y nutrientes de la parte aérea al suelo (López *et al.*, 2012) así mismo mencionan que más de la mitad de los nutrientes absorbidos por las plantas se debe a la incorporación de residuos vegetales de la misma planta (Aryal *et al.*, 2015, Sánchez-Silva *et al.*, 2017).

Los bosques hoy en día son mayormente estudiados por la cantidad de CO₂ atmosférico que pueden fijar, brindan diferentes servicios ambientales muy importantes para la vida del hombre y de la biósfera misma, el ciclo hidrológico es papel fundamental de los bosques, por lo cual se menciona que los bosques deben ser manejados de forma sustentable cuidando no romper este ciclo (Sanchez *et al.*, 2007).

Estudios en bosques de Antioquia se ha encontrado que el Potasio (K) muestra buena translocación, el nitrógeno (N) presenta bajas concentraciones en bosques montanos dada su baja tasa de mineralización, la translocación permite la conservación del fósforo evitando pérdidas por lavado foliar y por caída de hojas (León *et al.*, 2009).

2.7. El fósforo en los bosques

Las modificaciones en las prácticas forestales a menudo tienen un impacto en el funcionamiento y la durabilidad de los ecosistemas, el manejo forestal adecuado

debe estar orientado a la conservación de los ciclos geoquímicos para obtener mayor fijación de CO₂, por lo consiguiente mayor cantidad de biomasa en árboles. Se ha comprobado que el retorno de fósforo en bosques tropicales de tierras bajas y altas tiene un retorno muy lento y muy alta relación de materia seca/fósforo en la caída de biomasa, en comparación con los bosques templados que parece ser que el fósforo es reciclado con mayor eficiencia, aunque trabajos realizados sugieren que la disponibilidad de fósforo limita la caída de las hojas (Vitousek, 1984).

Kaspari et al. (2008), mencionan que la fertilización de bosques con nitrógeno y potasio no aumentan el crecimiento o la caída de las hojas y ramas, pero tiene influencia en el aumento de flores y frutos, a diferencia de las aplicaciones de fósforo que aumenta la caída de hojas, ramas y también presenta incremento en las flores y frutos. Por otro lado el aprovechamiento intensivo de los bosques reduce la transferencia de nutrientes, por lo cual uno de los desafíos actuales es entender los patrones, procesos y rutas del ciclo del carbono relacionado a otros nutrientes en la transición de los bosques (Aryal et al., 2015).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

El estudio se ubicó en la cuenca de abasto selva zoque, Chiapas (Figura 3). La cuenca tiene una superficie total de 302,805 hectáreas, de las cuales 227,619 hectáreas arboladas con asociaciones de pino encino, bosque de encino, bosque de encino pino, selva mediana sub-perennifolia y selva baja caducifolia, de esta superficie 168,114 hectáreas son susceptibles de aprovechamientos de materias primas forestales y cultivos bajo sombra. Se cuenta con 12,354 hectáreas bajo manejo y 9,516 hectáreas en intervención de 22 predios con programa de manejo forestal autorizado (Rosales et al., 2017).

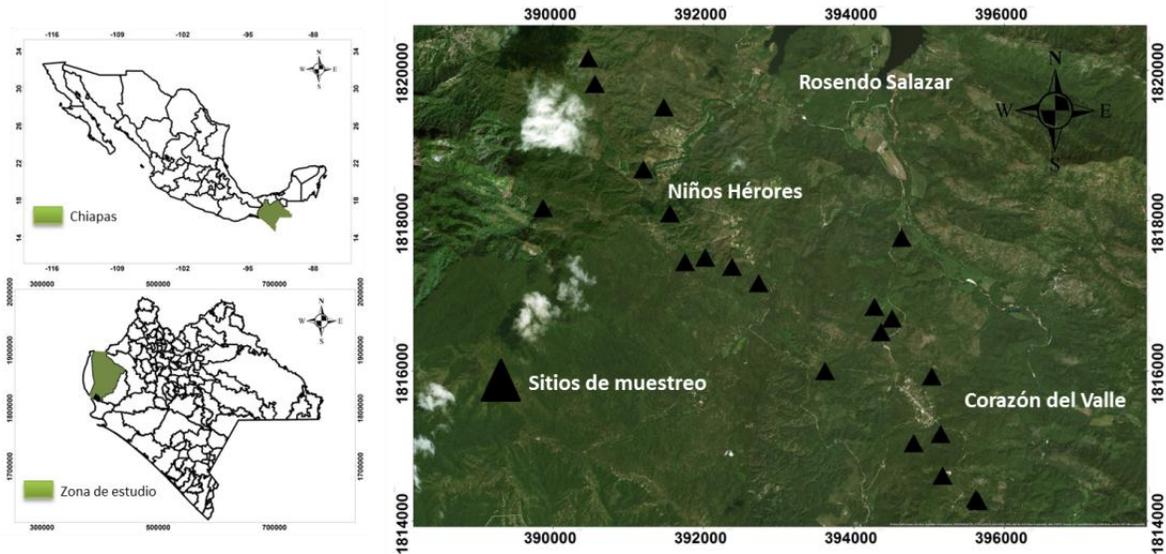


Figura 3. Mapa del área de estudio y sitios de muestreo.

Los muestreos se realizaron en áreas forestales de los ejidos que se ubican dentro del municipio de Cintalapa de Figueroa, Chiapas: Rosendo Salazar (Sin manejo forestal), Niños Hérores (Manejo forestal) y Corazón del Valle (Manejo forestal), se ubican entre las coordenadas $16^{\circ}24'50.80''\text{N}$ $93^{\circ}59'18.07''\text{O}$ y $16^{\circ}43'10.99''\text{N}$ $93^{\circ}59'35.12''\text{O}$, Capitán Rosendo Salazar: La economía de este ejido se basa principalmente en actividades ganaderas realizadas de forma ancestral la cual consiste en el cambio y uso de suelo para el establecimiento de potreros, este tipo de actividades por realizarse sin planificación han provocado la pérdida de grandes áreas provistas de vegetación. Manejo y aprovechamiento forestal ha sido una de las actividades en el área de estudio.

Para la selección de sitios se usó un mapa de vegetación del estado de Chiapas del año 2015, posterior a esto se hizo un recorrido de campo para verificar que las zonas de vegetación coincidieran, debido a que durante el recorrido se encontró que la vegetación no coincidía con la imagen satelital, se hicieron reuniones con los ejidatarios para acordar cuales sería los sitios a muestrear con base en su conocimiento del lugar para considerar zonas representativas y a si mismo zonas de interés. La edad de los sitios se obtuvo mediante preguntas a los productores. Se muestreo un total de 22 sitios en los tres ejidos, se identificaron sitios con y sin manejo forestal. Los muestreos y toma de datos se realizaron durante los meses de septiembre a diciembre.

Niños Héroes: el clima que predomina es cálido subhúmedo Aw2 (w), La precipitación anual es de 978 mm anuales y el principal tipo de suelo es Cambisol eútrico, cuenta con una superficie forestal de 2,319 hectáreas, de las cuales 1, 715 corresponden a superficie de conservación y aprovechamiento restringido; 605 hectáreas de superficie forestal para el aprovechamiento de madera y resina. Las especies que se aprovechan principalmente son *Pinus oocarpa*, *Quercus peduncularis* y *Quercus Polymorpha* (Cuadro 1), el territorio oscila entre 750 a 1000 ms.n.m.

Corazón del Valle: el clima que predomina es cálido subhúmedo Aw2 (w), con tipo de suelo Phaeozem y abarca el 3.9 % de la cuenca, la vegetación es selva mediana subperennifolia y bosque de encino-pino, con una precipitación de 1100 a 1300 mm anuales y el territorio oscila entre 750 a 1000 ms.n.m.

Las dos localidades se encuentran ubicada en el área de influencia de la reserva de la Biosfera la sepultura, la calidad del bosque es media debido a que la mayoría de los árboles existentes quedaron de un aprovechamiento anterior.

Cuadro 1. Especies dominantes del ejido Corazón del Valle.

Nombre común	Nombre científico
Arbóreo	
<i>Pinus oocarpa</i>	Pino
<i>Quercus peduncularis</i>	Roble Blanco
<i>Quercus polymorpha</i>	Roble
<i>Quercus conspersa</i>	Roble encino
<i>Cecropia obtusifolia</i>	Guarumbo
<i>Bursera simaruba</i>	Mulato
<i>Ficus cotinifolia</i>	Amate
<i>Byrsonima crassifolia</i>	Nance
<i>Acacia milleriana</i>	Quebracho
<i>Salix Babilonica</i>	Sauce
<i>Cedrela odorata</i>	Cedro
<i>Dioon merola</i>	Espadaña
Arbustivo	
<i>Annona reticulata</i>	Anona
<i>Zexmenia frutescens</i>	Malacatillo
<i>Xanthosoma roseum</i>	Tequesquite

<i>Tithonia diversifolia</i>	Árnica
<i>Styrax argenteus</i>	Estoraque
<i>Cnidocolus aconitifolius</i>	Chaya
<i>Calliandra houstoniana</i>	Pelo de ángel
<i>Desmodium nicaragüens</i>	Hoja ceniza
<i>Eysenhardtia adenostylis</i>	Taray
<i>Acacia hindis</i>	Ishcanal
<i>Eugenia acapulcensis</i>	Cinco negrito
<i>Psidium molle</i>	Guayaba agria
<i>Psidium sartorianum</i>	Guayabillo
<i>Acacia collinsii</i>	Ishcanal
<i>Acacia spadicigera</i>	Ishcanal
<i>Acacia pennatula</i>	Quebracho
<i>Mimosa tenuiflora</i>	Tepescohuite

3.2. Método de muestreo

Se llevó a cabo un tipo de muestreo por parcelas anidadas (Figura 4), cada sitio consistió en un área de 1000 m² (radio de 17.85 m) con un círculo central interno de 400 m² (radio de 11.25 m) en el cual se tomaron datos y muestras de los diferentes reservorios: Biomasa aérea, madera muerta, hojarasca, mantillo, capa de fermentación y suelo.

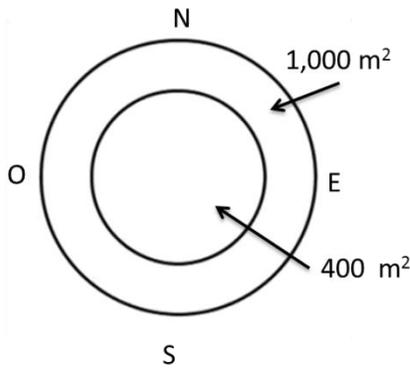


Figura 4. Área de muestreo por parcelas anidadas.

Para cada sitio, se usaron dos cuerdas sujetadas a una varilla que se dejó en el centro de cada parcela, la primera cuerda correspondía al círculo de 400 m² y la segunda cuerda correspondía a la cuerda de 1000 m², también se registró la

distancia del árbol al punto central, dichas cuerdas se usaban para diferenciar los árboles que correspondían a cada área.

3.3. Biomasa aérea

Se llevaron a cabo mediciones del diámetro con la ayuda de una cinta métrica, esta medida se realiza a la altura del pecho cuando la persona que mide es el mismo para todas las mediciones, pero para casos donde midieron diferentes personas entonces se utilizó un bastón o vara de 1.30 metros para evitar sesgos en las mediciones del diámetro a la altura del pecho, posteriormente los datos registrados se dividieron entre 3.1416 que corresponde al valor de PI para obtener el diámetro del árbol a la altura del pecho (Figura 5).

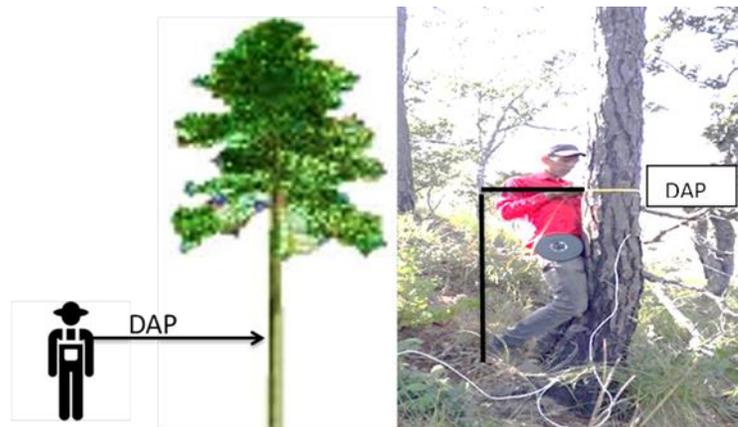


Figura 5. Medición de diámetro a la altura del pecho (DAP).

Para la altura del árbol se tomó la altura con la ayuda de un clinómetro. El uso del clinómetro consiste en dos escalas; porcentaje y escala en grados por lo cual la distancia debe permitir que estas escalas sean visibles a la altura de la parte más alta y más baja del árbol, el uso del clinómetro se hizo con ambos ojos abiertos, uno para ver la escala en grados o porcentaje y el otro para observar el objetivo (la parte del árbol de interés). Se ubicó la parte más baja visible del árbol y se sube el clinómetro a la altura de los ojos registrando ese ángulo como ángulo β , enseguida observa con el clinómetro de la altura de sus ojos a la parte más alta visible de la

copa del árbol para registrar el ángulo α (Figura 6). Esos datos sirvieron para calcular altura a través de la siguiente ecuación;

$$H = D (\tan \alpha + \tan \beta)$$

Dónde:

H = Altura del árbol en metros (distancia AB)

D = Distancia horizontal entre el árbol y el observador (m)

α = Ángulo del observador al ápice del árbol

β = Ángulo del observador a la base del árbol

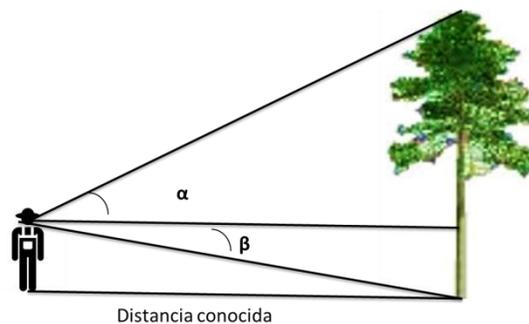


Figura 6. Ángulos considerados para determinar la altura del árbol con el uso del clinómetro.

El observador se ubicaba para cada árbol en una parte del sitio buscando estar al nivel de la base del árbol, de esta forma evitar confusiones a la hora de medir y determinar la altura total, dichos datos se utilizaron para la biomasa aérea con la ecuación de Ayala, 1998 donde $BA = (0.058) * ((DAP^2) * Alt)^{0.919}$.

3.4. Biomasa de raíces

Para las raíces se utilizó la ecuación propuesta por Cairns *et al.* (1997), debido a que estudiar las raíces implica más trabajo de campo, dicha ecuación se compone de la siguiente forma $Br = \exp(-1,0587 + 0,8836 \ln BA)$, donde: BR es biomasa de raíces, BA es biomasa aérea, lo que se agrega a esta ecuación es únicamente el logaritmo natural de la biomasa aérea que se obtiene con las medidas dasométricas.

3.5. Madera muerta

La madera muerta es también conocida como combustible, para este reservorio se utilizó la metodología de intersección planar de Van Wagner 1968 para medir la madera muerta de cada sitio, primeramente consistió en trazar dos líneas con las cintas métricas de norte a sur y de este a oeste (Figure 7).

El recorrido del levantamiento fue de la siguiente forma: partiendo del punto central a cada extremo del transecto, los primeros 10 metros consistió en levantar todo el combustible con límite de diámetro ≤ 7.5 cm, posteriormente los siguientes 5 metros se tomaron medidas de diámetros > 7.5 cm, este material considerado debía cruzar el eje central para ser medido, en caso de que la cinta coincidiera con el eje central del combustible no se consideró y finalmente si un combustible estaba enterrado no se consideraba.

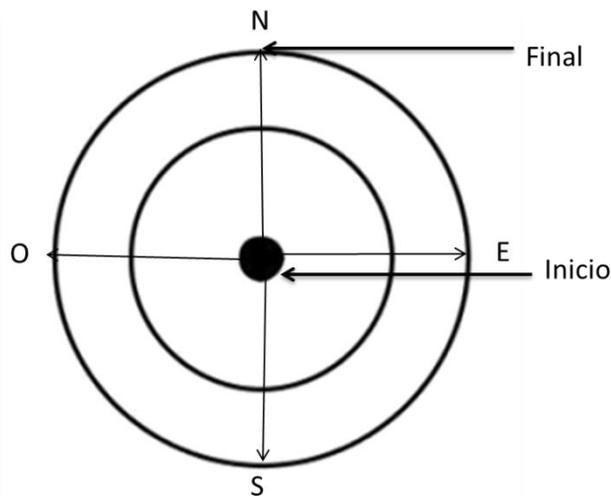


Figura 7. Transectos para el levantamiento de combustible mediante el método de intersección planar de Van Wagner.

En la medición de la madera muerta forestal se consideraron todos aquellos que provenían de árboles y arbustos que se encontraban sobre el suelo, entre ellos ramas y troncos que se hallaban separado de la planta viva, las ramas que continuaban unidas a un tronco muerto en pie no se consideraron, de igual forma los conos, corteza y hojas no se consideraron. Del material muerto intersectado se

clasificaron en tres diferentes grados de descomposición, verde; para el material verde la corteza y la madera estaba sólida y no se rompía fácilmente, descompuesto; esta categoría consistió en ver que la madera estaba con poca corteza o sin corteza y se sentía bofa y se quebraba fácilmente porque iniciaba a podrirse, muy descompuesto; esta categoría no tenía corteza, el peso muy liviano, la mayor parte podrida por lo cual se desagregaba fácilmente.

La metodología de intersección planar de Van Wagner se compone de la siguiente manera;

$$V = (\pi^2 \times \Sigma d_i^2) L$$

Donde:

V= Volumen por unidad de área

d_i= Diámetro en cm

L= Longitud del transecto.

3.6. Hojarasca, Mantillo y Capa de fermentación

Para el levantamiento de hojarasca, mantillo y capa de fermentación se utilizó un cuadrante de 30 x 30 cm, de norte a sur se ubicó un cuadrante en cada extremo del círculo de 1000 m² y de este a oeste se ubicó un cuadrante en cada extremo del círculo de 400 m² haciendo un total de 4 cuadrantes por sitio (Figura 8). Para el levantamiento de las muestras se usaron espátulas, primeramente se recortó con la espátula el margen del cuadrante para evitar una estimación errónea de la muestra, y también para evitar picaduras por insectos.

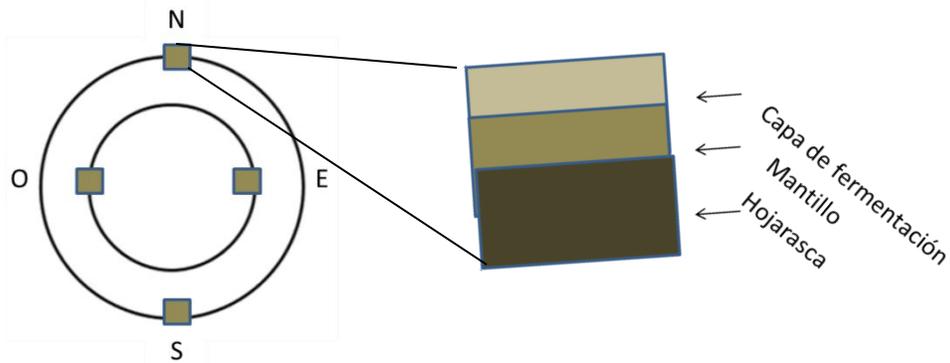


Figura 8. Levantamiento de capas de materia orgánica del suelo.

Hojarasca: Se levantaron cuidadosamente las hojas sin afectar las capas que estaban por debajo, la muestra se depositó en bolsas de papel estraza de 14x26 cm. se tomó la medida del espesor de la capa que se extrajo y se registró el peso de la muestra.

Mantillo: Esta capa se extrajo con el cuidado de no extraer parte de la capa de fermentación, principalmente estaba compuesta de materia orgánica descompuesta, cada muestra se depositó en bolsas de papel estraza de 14 x 26 cm y se tomó el espesor y el peso de la muestra.

Capa de fermentación: En la composición de esta capa se encontró materia orgánica mezclada con partículas de suelo, se midió el espesor con la ayuda de la regla y se cuidó de no mezclar con el suelo que se encontraba debajo de esta capa, posteriormente se depositó en bolsas de papel estraza de 14 x 26 cm.

Posterior al levantamiento de campo se llevó a laboratorio para ser secadas en una estufa de aire forzado durante 72 horas a una temperatura de 65 ° C alcanzado en este periodo su peso constante, después se hicieron muestras compuestas por sitios para ser molidas con un molino manual para granos, se tamizó con una malla número 20.

3.7. Muestreo de suelo

Después de haber extraído la capa de fermentación se efectuó la extracción del suelo en cada cuadrante. Se utilizó un cilindro de 10 cm de altura y 2 pulgadas de diámetro teniendo un total de 172.788 cm^3 . Se tomaron muestras de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm y 20 a 30 cm para densidad aparente, el cilindro se introdujo para cada profundidad con la ayuda de una placa de metal golpeada con un Mazo de metal, posteriormente el cilindro se extraía con la muestra con la ayuda de barretas de metal, enseguida se depositó cada muestra en bolsas de papel estraza de 12 x 18 cm, en caso de que la muestra de metal estuviera muy mojada se puso dentro de una bolsa de nailon. Las muestras para análisis químico se tomaron sobre una pared después de haber extraído las muestras para densidad aparente, con la ayuda de una pala recta y una barreta de metal se extrajo capa por capa (0 a 10 cm, 10 a 20 cm, 20 a 30 cm) se depositó cada muestra en bolsas de papel estraza de 12 x 18 cm, cada muestra no debía superar los 250 gramos. Las muestras de suelo para cuantificar la densidad aparente fueron secadas en el horno de circulación forzada a 105°C por 72 horas. Se calculó la densidad aparente como la proporción entre peso seco del suelo y volumen del cilindro.

3.8. Análisis del contenido de carbono en laboratorio

Para determinar carbono se utilizó el método de Walkley - Black (1934) con lectura por espectrofotometría de Heanes 1984, consiste en la recuperación total del C orgánico en muestras de suelo finamente molidas digeridas con el calor de dilución al mezclar dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) con ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado y posteriormente se leyó en el espectrofotómetro, para esto el espectrofotómetro se calibró con una cantidad conocida de carbono en forma de sacarosa (Figura 9). Se pesaron en una balanza semi-analítica 0.25 gramos de suelo por muestra, enseguida el suelo pesado se depositó en un matraz de 500 mL, se agregó 5 mL de dicromato de potasio y posteriormente 10 mL de ácido sulfúrico, se dejó reposar 30 minutos para lograr la digestión de la muestra y así permitir que la muestra se enfriara, a continuación se leyó en el espectrofotómetro a 600 nanómetros (nm). Para analizar

el contenido de carbono en hojarasca, mantillo, Se pesaron 0.025 gramos de materia vegetal, después del pesado se depositó en un matraz de 500 mL, se agregó 5 mL de dicromato de potasio seguido de 10 mL de ácido sulfúrico para lograr la digestión se dejó durante 30 minutos, a continuación se leyó con el espectrofotómetro a 600 nm.

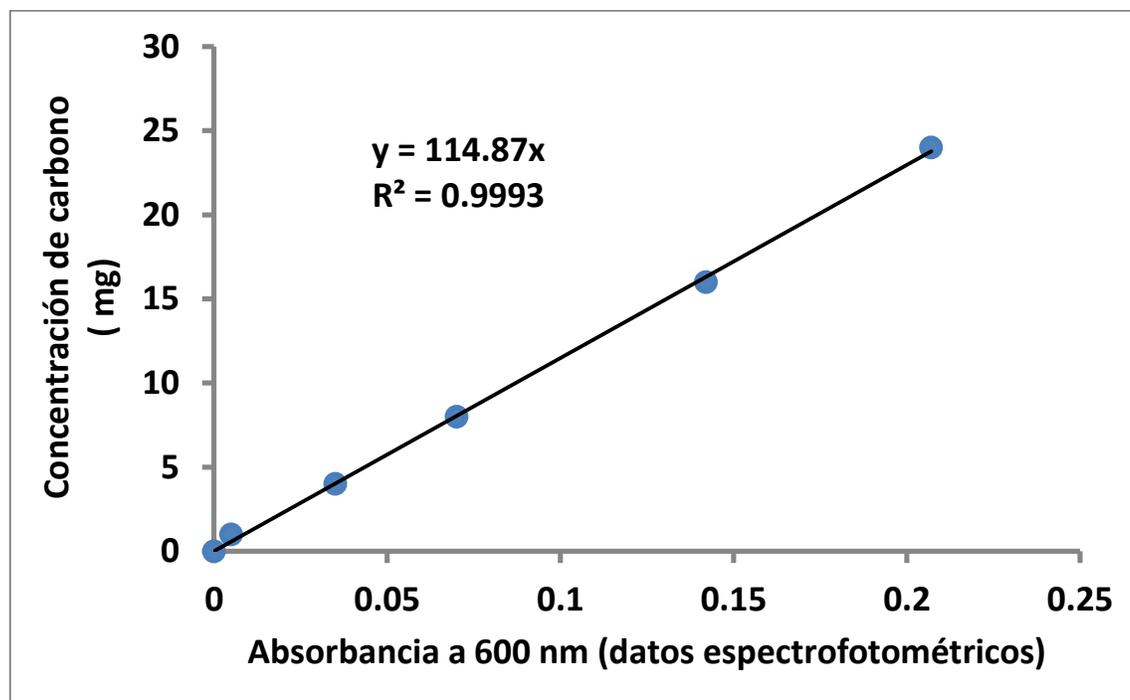


Figura 9. Curva patrón de la calibración del espectrofotómetro.

3.9. La tasa de acumulación de carbono

La tasa de acumulación o fijación de carbono es un indicador de que cantidad de carbono atmosférico está mitigando un ecosistema forestal. En este estudio, la tasa de acumulación de carbono (también conocido como tasa de secuestro de carbono), fue calculado por método de incremento media anual (IMA). El IMA consiste en dividir la cantidad de carbono acumulado (Mg ha^{-1}) por la edad de vegetación (años), así expresándose como $\text{Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

3.10. pH y potencial redox (Eh) del suelo

Se pesaron 10 gramos de muestra de suelo tamizado, posteriormente se le agrego 20 mL de agua destilada haciendo una relación 2:1, enseguida se subieron a un agitador orbital a 99 rpm durante 30 minutos al finalizar la agitación se determinó el pH y Conductividad Eléctrica con un potenciómetro regulado (Fisherbrand AE150) a 25 °C, la calibración del equipo se hizo con una solución conocida a un pH de 4.

3.11. Análisis de fósforo

Se utilizó el método de Bray y Kurz 1 para analizar el contenido de fósforo intercambiable del suelo porque el suelo del área de estudio es ácido. El análisis se realizó en el laboratorio de fertilidad de suelo y química ambiental del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. En este método, el fósforo intercambiable es extraído por la solución extractora hecha por una combinación de Fluoruro de amonio (NH_4F) y ácido clorhídrico (HCl). Esta solución remueve formas de fósforo ácido solubles como los fosfatos de calcio y una porción de fosfatos de aluminio y hierro. El NH_4F disuelve los fosfatos de aluminio y de hierro al formar un ion complejo con estos iones metálicos en solución ácida (NOM-21).

3.12. Análisis de datos

Los sitios de muestreo fueron clasificados por el gradiente de elevación: a) 701 – 800, b) 801 – 900 y c) 901 -1000 metros sobre el nivel del mar. Se realizaron pruebas de análisis de varianza (ANOVA) para algunas variables con la finalidad de checar la diferencia estadística en los reservorios de carbono por el gradiente de elevación. Para conocer las relaciones entre las variables, se llevó a cabo análisis de correlación, regresión y análisis multivariados. Se realizó un análisis de componentes principales y una clasificación general y árbol de regresión para explorar las relaciones entre múltiples variables como reservorios de carbono, propiedades de suelo y aspectos de manejo y condiciones geográficas de los sitios de muestreo. Se utilizó el programa de Statistica versión 10.0 para los análisis estadísticos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Carbono almacenado en biomasa arbórea

En los análisis de datos de carbono en biomasa área, biomasa de raíces y biomasa viva total en los sitios categorizados por la elevación, no se encontró una diferencia significativa (ANOVA de una vía, DF = 2, 19; F = 0.68 p = 0.52) entre los diferentes gradientes de elevación. Los valores medios de carbono en biomasa área variaron entre 49.9 y 62.9 Mg C ha⁻¹, mientras los valores de carbono en biomasa de raíces variaron entre 12.5 y 13.6 Mg C ha⁻¹ (Cuadro 2).

Cuadro 2. Cantidad de carbono almacenado (Mg C ha⁻¹) en biomasa área (CBA), biomasa de raíces (CBR) y biomasa viva total (CBTot = BA+BR) entre tres diferentes gradientes de elevación en la Cuenca de Selva Zoque de Chiapas. Los valores son las media y respectivos 95% intervalos de confianza. Mismas letras seguidas por la media indican que no hay diferencias significativas (Tukey p>0.05).

Elevación	CBA media	CBA -95%	CBA +95%	CBR media	CBR -95%	CBR +95%	CBTot media	CBTot -95%	CBTot +95%	N
901-1000	49.9 ^a	-15.4	115.2	12.5	-2.6	27.7	62.4 ^a	-18.0	142.8	3
801-900	62.6 ^a	52.0	73.3	15.5	13.0	18.0	78.2 ^a	65.1	91.3	14
701-800	62.9 ^a	54.0	71.8	15.6	13.6	17.6	78.5 ^a	67.6	89.4	5

La cantidad de carbono en biomasa arbórea tiende a aumentar paulatinamente por la edad forestal (años después del corte selectivo de árboles maderables). Sin embargo, en este estudio no se logró demostrar la diferencia estadística entre las categorías de edad forestal. La cantidad de carbono en biomasa arbórea en los sitios de 20 a 29 años fue 67.5 ± 8.2 Mg C ha⁻¹ mientras en los sitios de 50 a 59 fue 104.2 ± 9.7 Mg C ha⁻¹ (Figura 10).

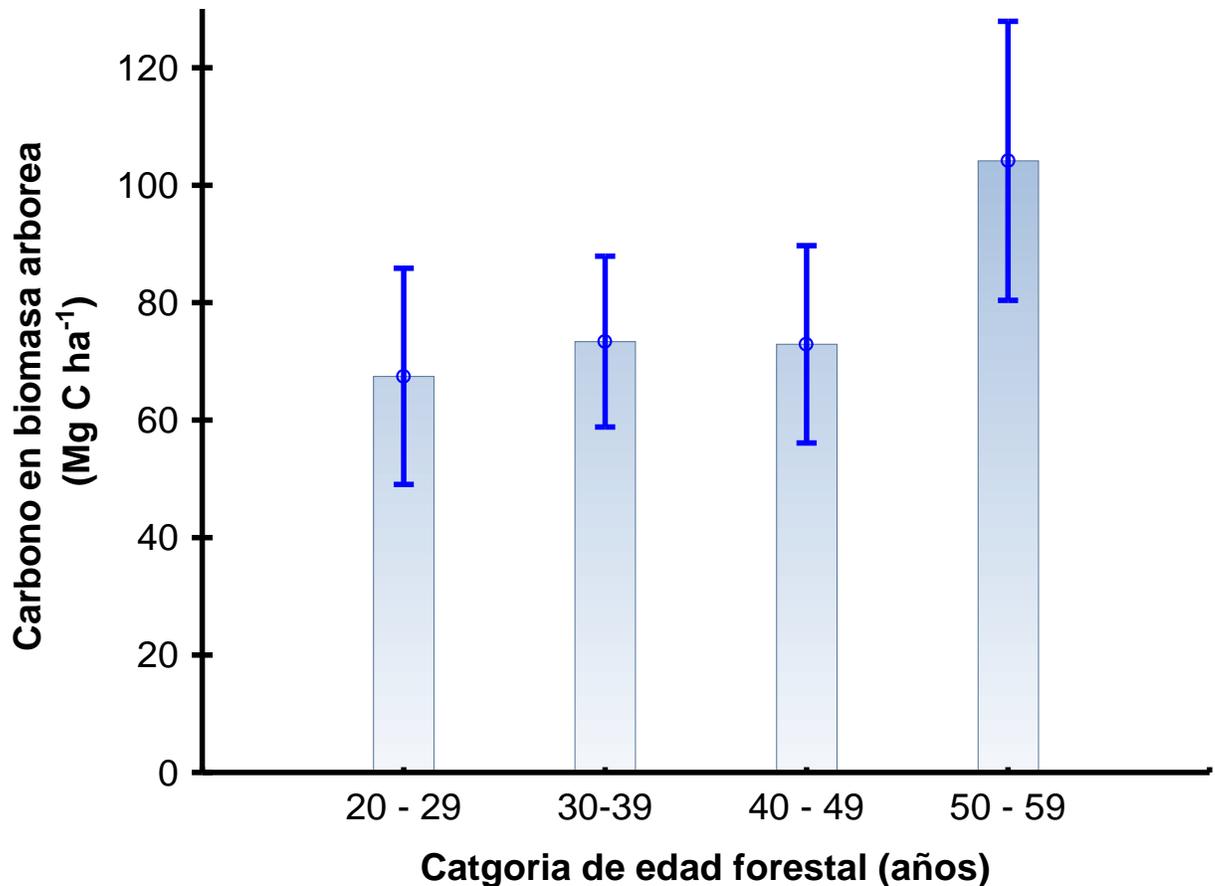


Figura 10. Cambio en la cantidad de carbono en biomasa arborea (Mg C ha⁻¹) con la edad después de aclareo (aprovechamiento forestal).

Entre los sitios muestreados con manejo forestal y los sitios sin manejo, no se encontró diferencia significativa en la cantidad de carbono en biomasa aérea. Tampoco hubo diferencia estadística entre los sitios con y sin pastoreo por ganado. Los análisis factoriales mostraron que no existe alguna interacción significativa entre estos dos variables. Los valores medias de carbono en biomasa arborea (biomasa aérea + biomasa de raíces) variaron entre 62.5 y 82.6 Mg C ha⁻¹ (Cuadro 3).

Cuadro 3. Cantidad de carbono almacenado en biomasa arborea como efecto del manejo forestal y actividad ganadera. CON (sitios con manejo), SIN (Sitios sin manejo), C BA (Carbono en biomasa aérea) $F(1, 20) = 0.51$, $p = 0.482$. IC es intervalo de confianza.

Manejo	Pastoreo de Ganado	Media	Error std.	95%- IC	95%+IC	N
Carbono en biomasa aérea						
CON	NO	49.9	8.6	27.9	72.0	6
CON	SI	66.2	7.8	47.1	85.3	7
SIN	NO	64.0	5.6	46.3	81.7	4
SIN	SI	64.4	3.6	54.3	74.5	5
Carbono en biomasa de raíces						
CON	NO	12.5	2.0	7.3	17.8	6
CON	SI	16.3	1.8	12.0	20.7	7
SIN	NO	15.9	1.3	11.8	19.9	4
SIN	SI	16.0	0.8	13.6	18.3	5
Carbono en biomasa total arbórea						
CON	NO	62.5	10.6	35.2	89.8	6
CON	SI	82.6	9.6	59.1	106.0	7
SIN	NO	79.8	6.8	58.1	101.6	4
SIN	SI	80.4	4.5	67.9	92.8	5

4.1.2. Carbono en hojarasca, mantillo y capa de fermentación

La cantidad de carbono en hojarasca (la capa fresca) vario entre 1.27 y 1.35 Mg C ha⁻¹, mientras el mantillo (la capa fragmenta) vario entre 2.73 y 4.27 Mg C ha⁻¹ (Cuadro 4). No se encontró diferencia significativa entre los sitios de diferentes elevaciones. La cantidad total de carbono en la hojarasca (suma de las tres capas) se encuentra en el rango de 7.05 a 9.53 Mg C ha⁻¹.

Cuadro 4. Cantidad de carbono almacenado (Mg C ha⁻¹) en tres diferentes capas de hojarasca entre los gradientes de elevación del bosque de pino en la cuenca de Selva Zoque, Chiapas. IC es intervalo de confianza.

Capas de hojarasca	Cantidad de carbono (Mg C ha ⁻¹) entre gradientes de elevación		
	901-1000 amsl	801-900 amsl	700-800 amsl
Hojarasca (fresco)			
Media	1.27	1.30	1.35
IC-95%	0.31	1.03	0.44
IC+96%	2.24	1.58	2.26
Mantillo (fragmentado)			
Media	4.27	3.04	2.73

IC-95%	-7.41	2.00	-0.82
IC+96%	15.95	4.07	6.27
Capa de fermentación			
Media	3.99	4.21	2.97
IC-95%	-5.75	2.87	-0.78
IC+96%	13.73	5.56	6.72
Total de tres capas			
Media	9.53	8.55	7.05
IC-95%	-12.67	6.17	-0.72
IC+96%	31.74	10.93	14.81
N	3	14	4

Comparando con el manejo, la cantidad de carbono entre los sitios manejados y no manejados no variaron significativamente (Cuadro 5).

Cuadro 5. Toneladas de carbono en hojarasca en sitios con manejo y sitios sin manejo. IC es intervalo de confianza

Manejo	Hojarasca- Media	Hojarasca error estándar	Hojarasca - 95% IC	Hojarasca + 95% IC	N
CON	7.492456	1.300972	4.778677	10.20624	13
SIN	9.614896	1.563573	6.353339	12.87645	9

CON (sitios con manejo), SIN (Sitios sin manejo), C BA (Carbono en biomasa aérea), F (1, 20)=1.0888, p=.30918.

4.1.3. Carbono en madera muerta

La cantidad media de carbono en madera muerta vario entre 4.4 a 8.3 Mg C ha⁻¹ dependiendo de la edad de vegetación después de aprovechamiento forestal. Se presentó un ligero decremento y luego un incremento paulatino con la edad del bosque. Estadísticamente, se encontró una diferencia significativa entre las edades de 30 - 39 y 50 - 59 años. (Figura 11). El gradiente de elevación no tuvo un efecto significativo en carbono en madera muerta.

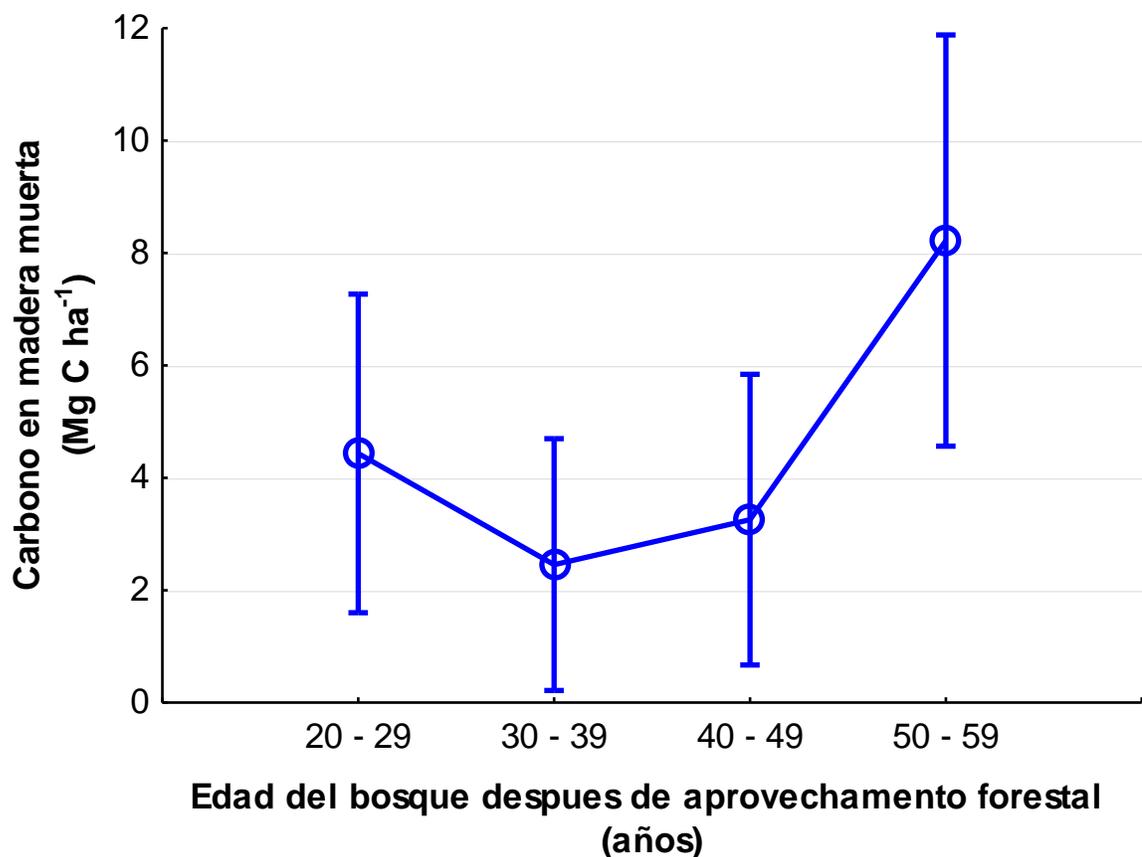


Figura 11. Cantidad de carbono almacenado en madera muerta por la categoría de edad forestal (después de aprovechamiento $F(7, 14) = 2.965$, $p = 0.0397$ (LSD).

4.1.4. Carbono orgánico del suelo

La cantidad media de carbono orgánico del suelo (0 – 30 cm de profundidad) vario de 2.6 a 3.8%, sin embargo no se encontró una diferencia significativa entre los categoría de edad (Cuadro 6).

Cuadro 6. La cantidad media carbono orgánico de suelo (COS %) en los sitios de muestreo con diferentes edades de vegetación. IC es intervalo de confianza.

Catg-edad	% COS media	Error estándar	IC -95%	IC +95%	N
20 - 29	3.1	0.3	2.4	3.9	5
30-39	2.8	0.2	2.3	3.2	8
40 - 49	2.6	0.2	2.2	3.0	6
50 - 59	3.8	1.3	-1.8	9.5	3

Comparando con el gradiente de elevación, el de carbono orgánico suelo, no se encontró una diferencia estadística significativa ($P>0.05$). Los valores medias de almacenamiento de carbono orgánico de suelo fueron de 124.8 a 154.2 Mg ha⁻¹.

Cuadro 7: Contenido (%) y almacén (Mg ha⁻¹) de carbono orgánico de suelo comparado entre los gradientes de elevación. IC es intervalo de confianza.

Elevación	Media	Error est.	-95% IC	+95% IC	N
COS (%)					
901-1000	2.7	0.5	0.7	4.7	3
801-900	3.0	0.3	2.4	3.6	14
700-800	2.9	0.2	2.4	3.5	5
COS (Mg ha ⁻¹)					
901-1000	152.2	29.8	24.2	280.2	3
801-900	154.2	10.6	131.3	177.2	14
700-800	124.8	13.2	88.1	161.4	5

4.1.5. Carbono total

La cantidad de carbono total se encontró en el rango de 213.9 a 245.1 Mg C ha⁻¹ dependiendo del gradiente de elevación (Cuadro 8). Estos valores de media no variaron significativamente ($p>0.05$).

Cuadro 8. La cantidad de carbono total en toneladas de carbono por hectárea por el gradiente de elevación (Mg C ha⁻¹). $F(2, 19) = 0.873$, $p = 0.434$. IC es intervalo de confianza

Elevación	Total t C ha ⁻¹ Media	Error estándar	IC -95%	IC +95%	N
901-1000	227.5	32.8	86.3	368.8	3
801-900	245.1	13.6	215.8	274.4	14
700-800	213.9	9.3	188.1	239.6	5

4.1.6. Propiedades de suelo

El pH de suelo en los sitios de muestreo indica que el suelo de región es ácido ya que los valores de las media oscilaron entre 4.7 y 4.9. No hubo diferencia significativa entre los gradientes de elevación de los sitios de muestreo. Los valores medias del potencial de redox de suelo oscilaron entre 129.3 y 141.8 mV y se difirieron estadísticamente entre los sitios con diferentes elevaciones. Los valores medias de la densidad aparente de suelo oscilaron entre 1.4 y 1.9 g cm⁻³ y no hubo una diferencia estadística entre gradientes de elevación ($p > 0.05$).

Cuadro 9. Las propiedades de suelo en los sitios de muestreo por el gradiente de elevación

Elevación	Media	Err. Std.	-95% IC	+95% IC
pH del suelo				
901-1000	4.7	0.3	3.2	6.1
801-900	4.7	0.0	4.6	4.8
700-800	4.9	0.1	4.7	5.1
Potencial redox (Eh, mV)				
901-1000	134.2	22.6	36.9	231.5
801-900	141.8	4.4	132.2	151.4
700-800	129.3	5.0	115.3	143.4
Densidad aparente de suelo (g cm⁻³)				
901-1000	1.9	0.1	1.7	2.1
801-900	1.7	0.0	1.6	1.8
700-800	1.4	0.1	1.2	1.6

Además, se encontró una correlación positiva ($r = 0.48$, $p < 0.05$) entre el contenido de carbono orgánico de suelo (%) y potencial redox (Eh). La regresión entre estas variables tienen su bondad de ajuste bajo por las altas variaciones entre los sitios de muestreo (Figura 11).

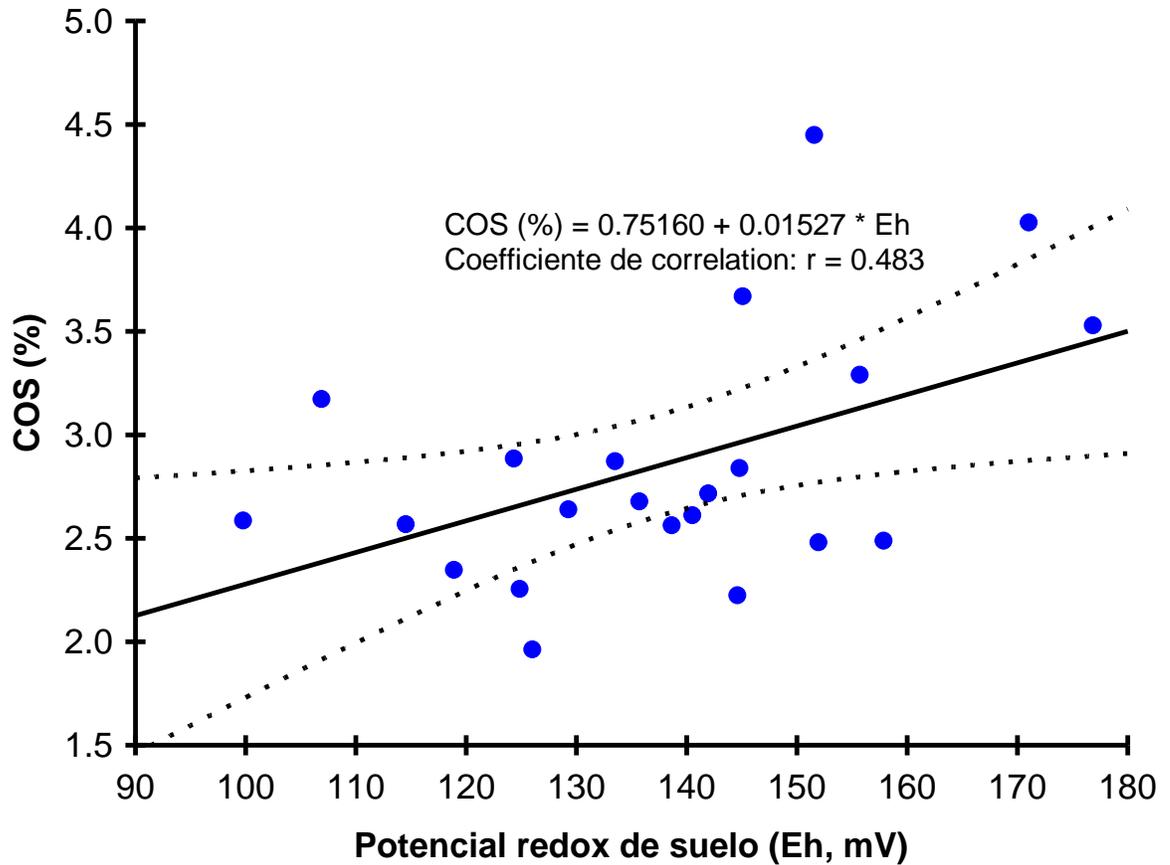


Figura 12. Relación entre carbono orgánico de suelo (COS %) y potencial redox (mV)

4.1.7. Fósforo en el suelo y la relación carbono fósforo

El fósforo por ser un nutriente esencial en el desarrollo de las plantas se determina con diferentes técnicas de laboratorio para tener mayor precisión dependiendo de los diferentes condiciones químicas y físicas del suelo, con los resultados obtenidos por la técnica de Bray 1 no se encontraron diferencias significativas entre los sitios con diferentes gradientes de elevación. Los valores medias de la concentración de fósforo disponible en el suelo vario entre 2.75 y 4.06 partes por millón (Cuadro 10).

Cuadro 10. Concentración de fósforo disponible (ppm) con la técnica de Bray 1 entre diferentes gradientes de elevación estudiados.

Gradiente de elevación	Fósforo Media (ppm)	Error estándar	IC -95%	IC+ 95%	N
700-800	2.75	0.56	1.56	3.93	5
801-900	4.06	0.34	3.32	4.79	13
901-1000	2.82	0.72	1.29	4.35	3

CON (sitios con manejo), SIN (Sitios sin manejo), C BA (Carbono en biomasa aérea) (F(2, 18)=2.5621, p=0.10492)

El fósforo por ser uno de los macro-elementos esenciales que tiene más influencia en el desarrollo de las plantas y necesita estar equilibrado con el carbono para ser asimilado de forma más eficiente, para ello se analizó la relación carbono fósforo. Se encontró una diferencia significativa entre los gradientes de elevación. La mayor relación carbono fósforo de suelo fue en la altura 801 - 900, seguido por 700-800 y 901-1000 (Cuadro 11).

Cuadro 11. Relación carbono fósforo a diferentes gradientes de elevación.

Elevación	C:P-Media	C:P error estándar	C:P -95%	C:P + 95%	N
700-800	494.26 ^{ab}	80.27	325.61	662.92	5
801-900	334.16 ^b	49.78	229.56	438.75	13
901-1000	612.21 ^a	103.63	394.48	829.94	3

C:P: relación carbono fósforo. F (2, 18)=3.6135, p=.04794

4.1.8. Relación entre variables múltiples

En un análisis por componentes principales (basado correlaciones) de variables relacionados a carbono en biomasa viva, carbono orgánico de suelo, propiedades suelo y condiciones del sitio de muestreo, se encontró que los primeros cuatro componentes explicaron 74% de varianza (Cuadro 12). Primeros dos componentes explican solamente 48.8% de varianza.

Cuadro 12. Componentes principales y las varianzas explicadas por cada componente derivado de análisis multivariados.

Componentes	Eigen valores	Varianza %	Total de Eigen valores	Varianza acumulativa %
1	3.68	30.7	3.68	30.7
2	2.12	17.7	5.81	48.4
3	1.67	13.9	7.48	62.3
4	1.40	11.7	8.88	74.0
5	0.92	7.7	9.80	81.7
6	0.67	5.6	10.47	87.2
7	0.53	4.4	11.00	91.7
8	0.41	3.4	11.41	95.0
9	0.28	2.3	11.69	97.4
10	0.22	1.8	11.90	99.2
11	0.06	0.5	11.96	99.7
12	0.04	0.3	12.00	100.0

La relación entre las variables en dos primeros componentes principales se despliegan en la figura 12. Los variables como Potencial redox de suelo, pH, densidad aparente tienen mayor correlación con el componente 1, mientras, cantidad de fósforo disponible, pastoreo por ganado, carbono orgánico de suelo y elevación correlación más con el componente dos. También se puede apreciar que la edad, carbono en biomasa viva y hojarasca están positivamente relacionados mientras el carbono orgánico del suelo se relaciona inversamente con la presencia de ganado, hojarasca y biomasa viva (Figura 12).

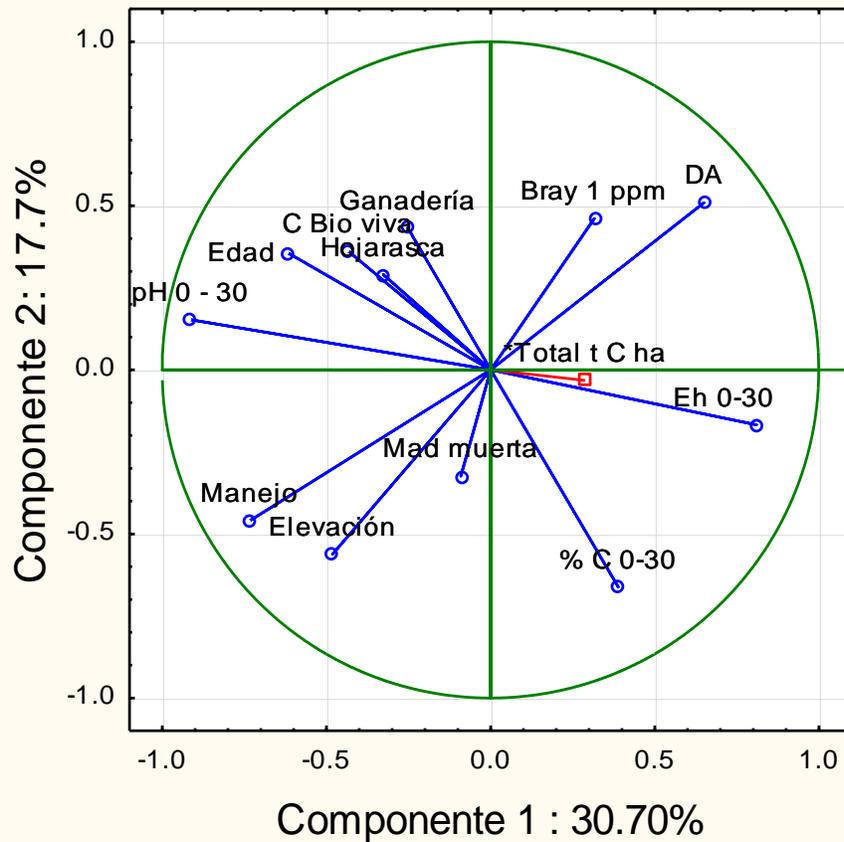


Figura 13. Relación entre múltiples variables generado por un análisis de componentes principales. El componente uno en eje X explica 30.7% de varianza mientras el componente dos en eje Y explica 17.7% de varianza total.

4.1.9. Tasa de captura de carbono

La tasa de acumulación o captura de carbono es la cantidad de carbono que un ecosistema fija (secuestra) de la atmósfera a sus reservorios en cierto periodo de tiempo. En este estudio, la tasa de captura de carbono en biomasa aérea vario en un rango de 0.54 a 2.99 Mg C ha⁻¹ año⁻¹. Se encontró que la tasa de captura de carbono disminuye con la edad de vegetación (Figura 13).

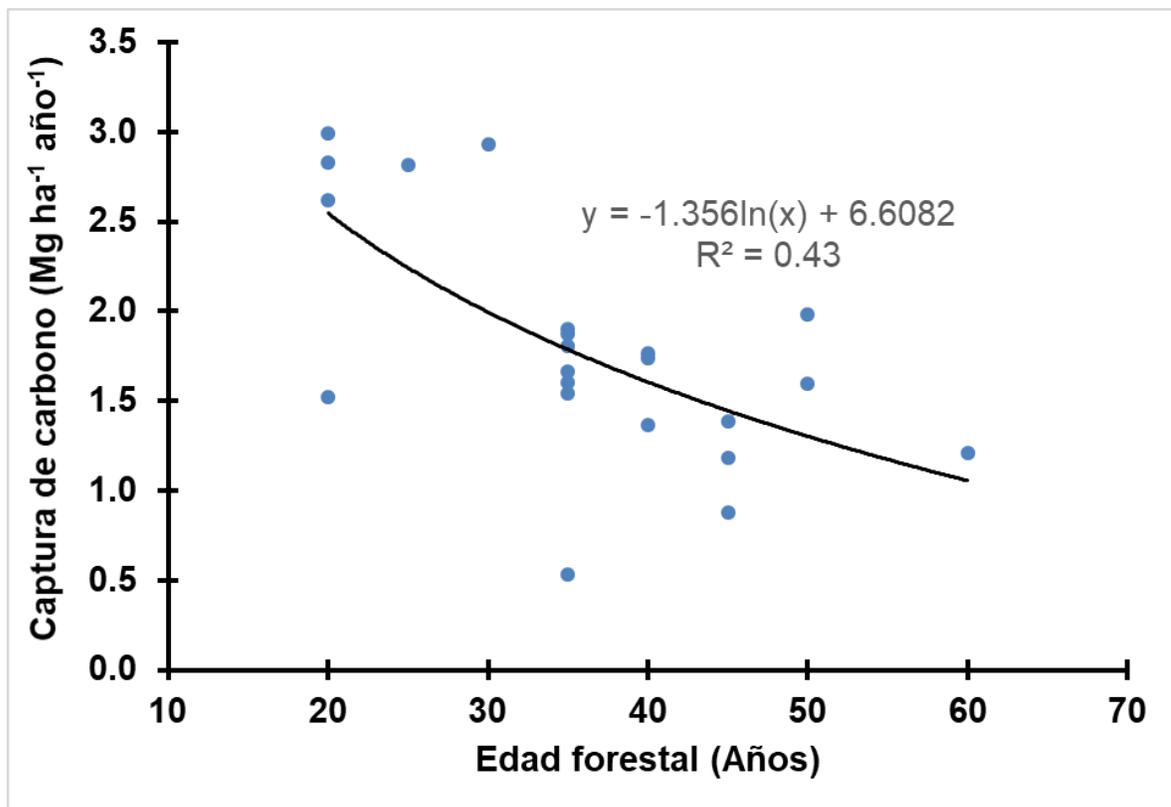


Figura 14. La relación entre edad forestal y la tasa de acumulación de carbono en biomasa aérea en ecosistemas forestales del estudio.

La tasa de acumulación de carbono en todos los reservorios variaron entre 3.6 y 16.3 Mg C ha⁻¹ año⁻¹. Sin embargo, esta cantidad fue calculada con la suma total de carbono en todos los reservorios sin restar la cantidad inicial de carbono orgánico del suelo. Una vez, restada la cantidad de carbono inicial tomando en cuenta el valor mínimo registrados en los sitios (104 Mg de COS ha⁻¹), la tasa de acumulación de carbono total llegaron a un rango de 0.95 a 11.1 Mg C ha⁻¹ año⁻¹. Estos valores incluyen el carbono en todos los reservorios medidos (i.e. biomasa aérea, biomasa de raíces, hojarasca, madera muerta y carbono orgánico del suelo). Los análisis de regresión muestran que la tasa acumulación de carbono en ambos casos se reducen con la edad de vegetación. Sin embargo, en segundo caso, los datos se ajustan mejor en un modelo cuadrático, lo cual indica que la tasa disminuye al inicio hasta 45 años y puede aumentar paulatinamente otra vez después de esa edad (Figura 14).

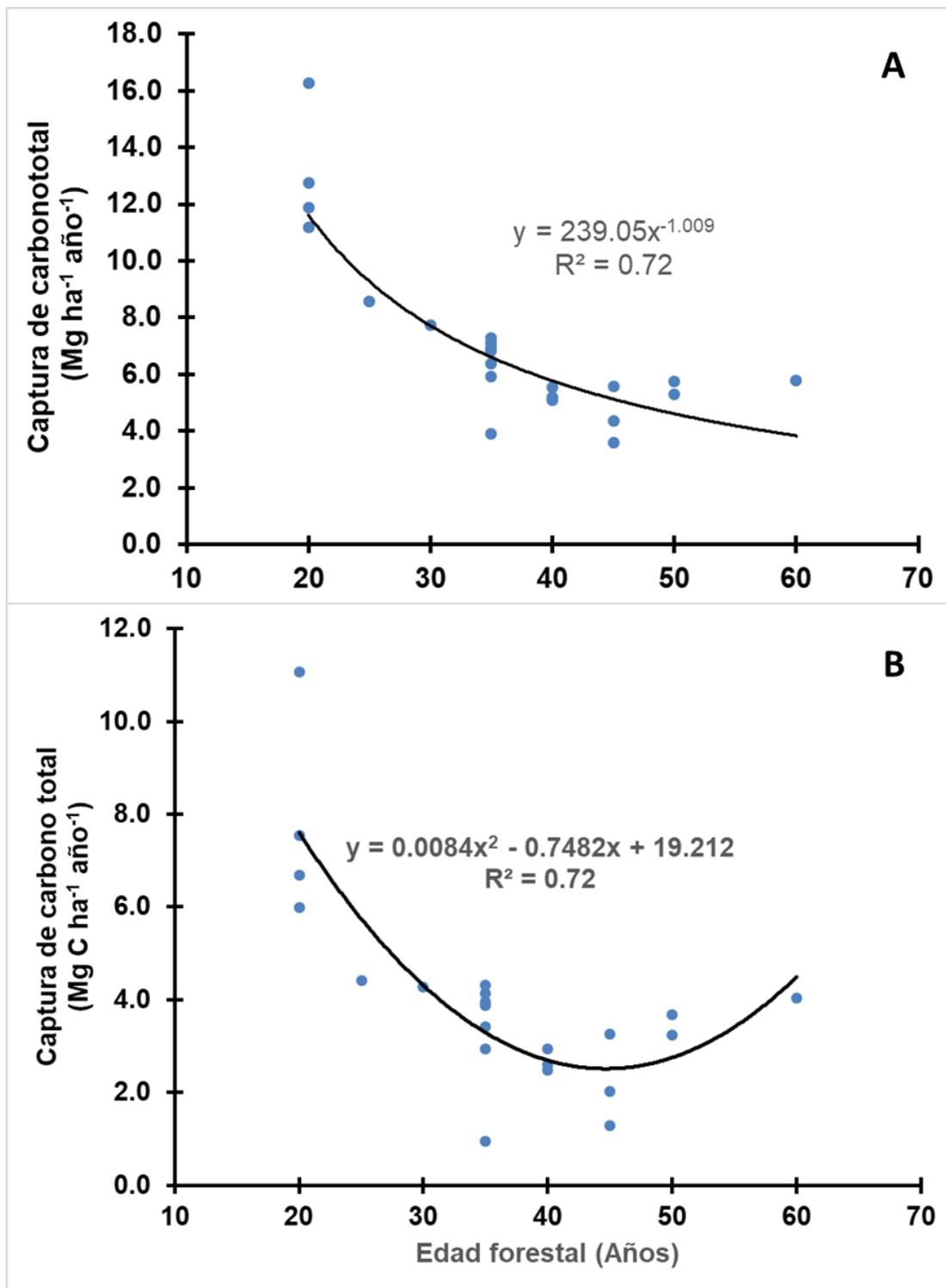


Figura 15. La relación entre edad forestal y la tasa de acumulación de carbono total en ecosistemas forestales del estudio. A) Calculo de la tasa incluyendo toda la cantidad de carbono orgánico de suelo (COS); B) Calculo de la tasa restando 104 Mg de COS como línea base o stock original en el suelo sin intervención.

4.2. DISCUSIÓN

4.2.1. Carbono en biomasa arbórea a diferentes elevaciones

El promedio de carbono en biomasa aérea por hectárea para el presente estudio fue de 60.96 t, este valor es menor a 74.25 t C ha¹ reportado por Gonzales (2008) para *Pinus oocarpa*, mientras que supera a 38.69 t C ha¹ reportado por Gutiérrez *et al.* (2018). en la misma región de estudio. Pastor *et al.* (2015), encontraron diferencias en la acumulación de carbono a diferentes elevaciones para zonas áridas siendo las de mayor elevación con mayor acumulación de carbono correlacionado positivamente con la precipitación y negativamente con la temperatura.

Analizando la elevación se puede observar al comparar con otros estudios que la elevación no parece ser la variable con efecto más claro en la acumulación de carbono debido a que los bosques estudiados son sometidos a diferentes formas de manejo, resultado de otras investigaciones a diferentes elevaciones reportan resultados de 38.69 t C ha¹ reportados por Gutiérrez *et al.* 2018 se encuentra dentro de la región y elevación estudiada, 20.32 t C ha¹ a un 1570 ms.n.m, 99.07 t C ha¹ a 1992 ms.n.m.

La biomasa aérea de bosques de *Pinus oocarpa* supera a la biomasa que se encuentra en sistemas agroforestales como cacao (*Theobroma cacao*) y Café (*Coffe arábica*), pero no se descarta que cada sistema tiene un beneficio ambiental, económico y social (Concha, 2007). Callo *et al.* (2002), encontraron en bosques Amazónicos de Perú que los bosques primarios y por regeneración natural superan a los sistemas agroforestales como reservorios de carbono.

Hernández *et al.* (2020), mencionan que la presencia de ganadería afecta la composición de la flora, por lo tanto el repoblado de los árboles se ve afectado. En este estudio entre sitios con presencia de ganadería no se encontraron diferencias significativas. Para los sitios con manejo y sitios sin manejo, Hernández *et al* (2020) no encontraron diferencias significativas en un estudio entre los dos pero los sitios sin manejo tienen ligeramente mayor cantidad de carbono que los sitios con manejo.

Cabe mencionar que los sitios con manejo se han aprovechado madera, dicha madera se usa para diferentes artículos que permiten al carbono conservarse por más tiempo y no ser emitido a la atmósfera por la descomposición. Traversa y Alejano, (2013) mencionan que las prácticas silvícolas modifican la composición y complejidad estructural del bosque.

Con respecto a la tasa de acumulación de carbono en biomasa aérea, Aryal y Ruiz-Corzo (2020) reportaron entre 3.8 y 7.8 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ en los bosques de *Pinus ocarpa* en la región Frailesca de Chiapas. En este estudio, la tasa de acumulación varió entre 0.5 y 3.0 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, lo cual es menos y esta variación puede atribuirse a la diferencia en el manejo forestal y condiciones topográficas de los sitios de estudio.

4.2.2. Carbono en hojarasca

La hojarasca, mantillo y capa de fermentación se resumió en un solo grupo llamado hojarasca el cual se obtuvo como promedio de carbono para este estudio fue de un rango que va de 7.05 a 9.53 Mg C ha⁻¹, lo cual es inferior a 11 Mg C ha⁻¹ y superior a 5 Mg C ha⁻¹ reportado por Bolaños *et al.* (2016) en bosques de oyamel y Ciprés respectivamente en Texcoco estado de México. Para bosque de pino encino Rodríguez *et al.* (2009) reporta 9.9 Mg C ha⁻¹ de hojarasca. En el bosque de *Pinus oocarpa* en el municipio de Villaflores, Chiapas, Aryal y Ruiz-Corzo (2020) reportaron de 4.2 a 9.2 Mg C ha⁻¹ en hojarasca. En un bosque sub-caducifolia del municipio de Villaflores, Chiapas, Aryal *et al.* (2018) reportaron 4.8 Mg C ha⁻¹ en hojarasca, lo cual es bajo comparado con la cantidad en este estudio.

La acumulación y descomposición de la materia orgánica es el principal retorno de nutrientes en los bosques naturales (Aryal *et al.*, 2015, Sánchez-Silva *et al.*, 2017) en ese sentido es importante mencionar que la cantidad de hojarasca depende del tipo de vegetación y composición química, debido a que de esto depende su descomposición, así como de los microorganismos que se encuentran en el suelo. Leyva *et al.* (2020) menciona que los bosques a medida que aumentan de edad también aumenta la capa de mantillo y capa de fermentación. Un estudio en

diferentes edades en vegetación en la reserva de Calakmul Campeche demostró que de manera general el mantillo tiende a aumentar a medida que aumenta la edad, mientras que disminuye la cantidad de carbono que se almacena al año disminuye conforme la edad de sucesión aumenta (Euan Chi, 2013).

4.2.3. Carbono en madera muerta

La madera muerta es un reservorio importante que además de contribuir como reservorio en la acumulación de carbono también juega un papel muy importante como hábitat de micro-fauna. Araujo *et al.* (2011), mencionan la importancia de hacer este tipo de estudios de campo debido a que mediante imágenes satelitales este importante reservorio no se puede medir con tal precisión. Para este estudio, la madera muerta varió entre 4.4 y 8.3 Mg de C ha⁻¹, lo cual es inferior a lo reportado por Aryal *et al.* (2014) y Bolaños (2017); Aryal *et al.* (2018), quienes calcularon 35.87 y 16 Mg C ha⁻¹ para bosques de pino y bosques secundarios subperennifolios respectivamente.

Díaz *et al.* 2020, en Concordia Argentina encontraron para zonas secas 16.7 t ha y 9.02 Mg C ha⁻¹ para selva de las zonas húmedas. La comparación de madera muerta entre los diferentes tipos de vegetación varía por diversos factores como es el tipo de manejo, relieve, tipo de vegetación, edad de la vegetación y condiciones del clima. La madera muerta es pobre en elementos nutritivos, principalmente está compuesta de carbono y pocas cantidades de potasio, calcio, fósforo y compuestos nitrogenados (Delgado y Pedraza, 2002).

4.2.4. Carbono orgánico del suelo

En este estudio, el carbono orgánico del suelo fue el principal reservorio seguido de la biomasa aérea, lo cual es similar a bosque de ciprés donde el COS es el más grande pero es diferente a bosques de *Abies religiosa* donde la biomasa es el principal reservorio de carbono seguido del carbono orgánico del suelo. La biomasa de raíces en los diversos estudios se encuentra como el tercer reservorio de importancia seguidos de la madera muerta y finalmente la hojarasca (Aryal y Ruiz-Corzo, 2020).

Galicia *et al.* 2015, encontraron que la acumulación de carbono varía según el tipo de especies, relieve y tipo de suelo, siendo los Andosoles los que tienen mayor capacidad de retención de COS, así mismo mencionan que la intervención antropogénica es la principal causa del cambio en la pérdida de carbono en un bosque. Covalada (2010), ha encontrado en el estado de Chiapas que el cambio y uso del suelo de bosques puede conducir a la pérdida de 132 Mg C ha⁻¹.

En el análisis por componentes principales (Grafica 12) se encontró que no es una sola variable que tiene efecto sobre la acumulación de carbono, esto también concuerda con lo mencionado por Aryal *et al.* 2014 y Casiano-Domínguez *et al.*, 2018, donde el manejo, la edad, la disponibilidad de nutrientes y condiciones ecológicas pueden afectar la acumulación de carbono en los ecosistemas.

Segura *et al.* 2005, encontraron en un estudio realizado a nivel nacional que las selvas húmedas y secas son los principales en la acumulación de carbono en suelo. Este estudio presenta 147.26 t C ha en el suelo, dicho reservorio es el principal entre todos los componentes del bosque, esto coincide con lo mencionado por Burbano (2018), que habla sobre la importancia del suelo en la retención de carbono para hacer frente al cambio climático, siendo el suelo uno de los reservorios más difíciles de recuperar al ser degradados.

4.2.5. Relación carbono fósforo

Los resultados de este estudio 2.75 y 4.06 mg C kg⁻¹ son inferiores al promedio nacional de 14.1 a 70.5 mg P kg⁻¹. Los resultados de este estudio también son inferiores al reportado por Lara (2019), donde reporta 5.5 – 11 mg kg⁻¹. Las concentraciones de fósforo son bajas en sitios de nuestro estudio que puede limitar las actividades de micro-organismos en suelo, reciclaje de nutrientes y consecuentemente la bajo crecimiento de biomasa área y subterránea. fósforo es un elemento que se requiere para formar ácidos nucleicos, lípidos, and ATP y ADP para la transferencia de energía en reacciones biológicas en los micro-organismos y plantas. En el análisis multivariado, entre otras variables el fósforo se relaciona con la cantidad total de carbono en sistemas forestales. Así mismo con el pH del suelo, en

pHs ácidos el P es retenido por Fe y Al, mientras que a pHs por arriba de 8 es retenido principalmente por Ca.

Una relación adecuada de carbono y fósforo puede activar los procesos microbiológicos de suelo en descomposición de materia orgánica y mineralización para mejorar la productividad y mayor captura de carbono. Cleveland y Liptzitz (2007) reportan una relación de 186:1 de C:P, por lo tanto los resultados de este estudio encontraron cuatro veces más dicha relación. El promedio de la relación carbono fósforo para este estudio fue de 412:1 ppm, lo cual demuestra que la concentración de fósforo es muy baja, en ese sentido el desarrollo del bosque se puede ver afectado por la falta de fósforo disponibles, en otro sentido esto también demuestra indirectamente que la presencia de microorganismos como hongos y bacterias puede ser bajo debido a que estos tienen amplia relación con este nutriente. Aryal *et al.* (2018), mencionan que el fósforo puede ser el cuello de botella en las actividades agropecuarias y forestales, así mismo mencionan que los resultados realizados a nivel nacional denotan que los niveles de fósforo son bajos con excepción de los sistemas de manglares, por lo tanto es importante considerar el estudio del fósforo en bosques de mayores edades para ver como la caída de hojas puede enriquecer o disminuir la disponibilidad del fósforo y con ellos regular la relación carbono-fósforo. Algunos estudios mencionan que el fósforo es un elemento que puede aumentar su disponibilidad con incendios moderados (Capulin *et al.*, 2010). Sin embargo, se requieren más investigaciones sobre el efecto de fuego en la mineralización del fósforo en ecosistemas forestales de la región.

5. CONCLUSIONES

Los ecosistemas forestales de la región almacena de 214 a 245 Mg C ha⁻¹ en biomasa y suelo y mitigan de 3.5 a 40.7 Mg de CO₂ de la atmosfera por año, implicando que estos sistemas son importantes sumideros de carbono.

Se demostró en este estudio que la elevación únicamente no puede explicar significativamente los patrones de almacenamiento de carbono, sino que múltiples variables como la elevación, propiedades de suelo y la edad de vegetación explican la variación de la cantidad total de carbono. Los resultados demostraron que es importante considerar de manera más profunda todas las variables que tienen efecto en el desarrollo de los bosques como son variables biológicas y físicas, debido a que la suma de todos los factores puede demostrar con mayor exactitud la acumulación de carbono en diferentes sitios.

La concentración de fósforo en el suelo de todos los sitios fueron bajos y la alta relación carbono fósforo puede limitar la descomposición de materia orgánica, reciclaje de nutriente y crecimiento de biomasa.

Una correlación positiva entre el potencial redox (Eh) de suelo y el contenido de carbono orgánico (%) indica que esta propiedad de suelo puede influir significativamente en la incorporación y almacenamiento de materia orgánica en los suelos ácidos de la zona.

Es importante considerar el estudio del fósforo en bosques de mayores edades para ver como la caída de hojas puede enriquecer o disminuir la disponibilidad del fósforo en el suelo y con ello regular la relación carbono-fósforo.

6. LITERATURA CITADA

- Aguilar S.H.A. 2016. Aplicación de dos inoculantes de biofertilizantes solubilizadores de fósforo a base de hongos en el cultivo de tomate. Universidad Autónoma Agraria Antonio. Narro.
- Araujo M.A. Parada G.A., Terán J.J., Baker T.R., Felpausch T.R. y Phillips O.L. Brienen R.J.W. 2011. Necromasa de los bosques de Madre de Dios, Perú; una comparación. Facultad de Ciencias Biológicas UNMSM. 18(1). 113-118.
- Aryal, D. R., & Ruiz-Corzo, R. (2020). Carbon accumulations by stock change approach in tropical highland forests of Chiapas, Mexico. *Journal of Forestry Research* 31, 2479–2493.
- Aryal, D. R., De Jong, B. H., Ochoa-Gaona, S., Esparza-Olguin, L., & Mendoza-Vega, J. (2014). Carbon stocks and changes in tropical secondary forests of southern Mexico. *Agriculture, ecosystems & environment*, 195, 220-230.
- Aryal, D. R., De Jong, B. H., Ochoa-Gaona, S., Mendoza-Vega, J., & Esparza-Olguin, L. (2015). Successional and seasonal variation in litterfall and associated nutrient transfer in semi-evergreen tropical forests of SE Mexico. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 103(1), 45-60.
- Aryal, D. R., Gómez Castro, H., Carmen García, N. D., José Ruiz, O. D. J., Molina Paniagua, L. F., Jiménez Trujillo, J. A., ... & Guevara Hernández, F. (2018). Potencial de almacenamiento de carbono en áreas forestales en un sistema ganadero. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(48), 150-180.
- Aryal, D. R., Gómez Castro, H., Carmen García, N. D., José Ruiz, O. D. J., Molina Paniagua, L. F., Jiménez Trujillo, J. A., ... & Guevara Hernández, F. (2018). Potencial de almacenamiento de carbono en áreas forestales en un sistema ganadero. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(48), 150-180.
- Aryal, D. R., Gómez-González, R. R., Hernández-Nuriasmú, R., & Morales-Ruiz, D. E. (2019). Carbon stocks and tree diversity in scattered tree silvopastoral systems in Chiapas, Mexico. *Agroforestry systems*, 93(1), 213-227.
- Aryal, D. R., Morales Ruiz, D. E., Tondopó Marroquín, C. N., Pinto Ruiz, R., Guevara Hernández, F., Venegas Venegas, J. A., Ponce Mendoza, A., Villanueva López, G., Casanova Lugo, F., Rodríguez Larramendi, L., Ley de Coss, A., Hernández López, A., Medina Jonapa, F., Velazquez Sanabria, C., Alcudia Aguilar, A. & Euán Chi, I. (2018). Soil organic carbon depletion from forests to grasslands conversion in Mexico: A Review. *Agriculture*, 8(11), 181.
- Burbano O.H. 2018. El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de ciencias agrícolas*. Artículo de reflexión. 34(1). 82-96.
- Benito, Y. (2016). Guía específica de trabajo sobre CO₂ y cambio climático. *Investiga I+ D+ i*, 10.
- Callo C.D., Alegre J.C. y Krishnamurty L. 2002. Estimación del carbono secuestrado por algunos sistemas agroforestales y testigos en tres pisos ecológicos de la amazonia del Perú. *Revista Chapingo*. Serie ciencias forestales y del ambiente. 8; 101-106.

- Capulín. G.J., Mohedano C.L. y Razo Z.R. 2009. Cambios en el suelo y vegetación de un bosque de pino afectado por incendio. *Tierra Lationamericana*. Instituto de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 28 (1). 79q-87.
- Cardoso C.M. Scholz M. y Antunes N.M. 2019. Phosphorus recovery from municipal wastewater treatment: Critical review of challenges and opportunities for developing countries. *Journal of Environmental Management*. ELSEVIER. 1 (248).
- Casiano-Domínguez, M., Paz-Pellat, F., Rojo-Martínez, M., Covalada-Ocon, S., & Aryal, D. R. (2018). El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: primera estimación en México. *Madera y bosques*, 24(SPE).
- Cegura C.M.A., Sánchez G.P., Ortíz S.C. y Gutiérrez C.M.C. 2005. Carbono orgánico en los suelos de México. *Tierra lationoamericana*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México. 21-28.
- Concha, Y. J., Alegre C. J. y Pocomucha V. 2002. Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L. en el departamento de san martín, peru. Departamento Académico de Biología, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú. 6(1,2)
- Change-IPCC, I. P. O. C. (2013). Resumen para responsables de políticas. 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, TF, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, SK Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y PM Midgley (eds.)*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. Disponible en: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_brochure_es.pdf. Acceso en, 21.
- Dawson C.J y Hilton J. 2011. Fertiliser availability in a resource-limited world: Production and recycling of nitrogen and phosphorus. *Food policy*. ELSEVIER. 1 (36). Pp. 14-22.
- Delgado L. y Pedraza R.M. 2002. La madera muerta en los ecosistemas forestales. *Recursos Genéticos Forestales México*. Foresta veracruzana. 4(2). 59-66.
- Escudero A.; Mediavilla S. 2003. Dinámica interna de los nutrientes. *Ecosistemas*. Revista Universidad de salamanca.
- Euan C. I. 2013. Carbono en el mantillo de las selvas medianas subperennifolias en diferentes grados de sucesión en Calakmul Campeche. Instituto tecnológico de Chiná. Tesis.
- Elser, J. J., Bracken, M. E., Cleland, E. E., Gruner, D. S., Harpole, W. S., Hillebrand, H., Ngai, J. T., Seabloom, E. W., Shurin, J. B., & Smith, J. E. (2007). Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology letters*, 10(12), 1135-1142.

- Galicia L., Gamboa C.A.M., Cram S., Chávez V.B., Peña R.V., Saynes V y Siebe C. 2015. Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana* 34: 1-29.
- GCA. 2017. Atlas Global del Carbono. Emisiones de CO2. <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>
- Goll D.S. Brovkin V. Parida B.R. Reick C.H. Kattge J. Reich P.B. Van Bodegom P.M. y Niinements U. 2012. *Biogeosciences Discuss.* 1 (9). Pp. 3173–3232
- González-Zárate, M. 2008. Estimación de la biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natural de *Pinus maximinoi* H.E. *Pinus oocarpa* var. *Ochoterenai* Mtz. *Quercus* sp. en el norte del Estado de Chiapas, México. Tesis de maestría en ciencias. 81 p.
- Gutierrez V.B. Y Montañón A.F. 2018. Captura de carbono y modelos alométricos para estimar biomasa en rodales naturales de *pinus oocarpa* schl. et cham. en Chiapas, México. *Recursos Forestales México.* 20 (2).
- Hernández M. J.A., Fierros A., Velázquez M.A. y Gómez G.A. 2020. Estimación de la biomasa aérea y carbono en rodales con y Sin manejo forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. *Madera y Bosques.* 26; 1
- Hontoria, C., Rodríguez-Murillo, J. C., & Saa, A. (2004). Contenido de carbono orgánico en el suelo y factores de control en la España Peninsular. *Edafología*, 11(2), 149-157
- Houghton, R. A., & Nassikas, A. A. (2017). Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850–2015. *Global Biogeochemical Cycles*, 31(3), 456-472.
- Jaramillo J.V. 2004. El ciclo global del carbono. Instituto de Ecología y Cambio Climático (INEEC).
- Kramer M.G. y Chadwick O.A. 2018. Climate-driven thresholds in reactive mineral retention of soil carbon at the global scale. *Natura Climate Change.*
- Kaspari, M., Garcia, M. N., Harms, K. E., Santana, M., Wright, S. J., & Yavitt, J. B. (2008). Multiple nutrients limit litterfall and decomposition in a tropical forest. *Ecology letters*, 11(1), 35-43.
- Leyva P.T., Fuentes P.M.H., De León. G.F. Y Cortéz P.M. 2020. Contenido de carbono y nitrógeno del suelo y mantillo en dos manejos forestales en la Sierra Norte de Oaxaca. *Síntesis Nacionales. Programa mexicano del carbono.* 230-235.
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., Pickers, P. A., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., & Canadell, J. G. (2018). *Global carbon budget 2018. Earth System Science Data* 10, 2141–2194.

- Martínez H.E., Fuentes E.J.P., Acevedo H.E. 2012. Carbono Orgánico y propiedades del suelo. Universidad de Chile, Facultad de ciencias forestales, Departamento de silvicultura. Pp.20-21
- Morales Ruiz, D. E., Aryal, D. R., Pinto Ruiz, R., Guevara Hernández, F., Casanova Lugo, F., & Villanueva López, G. (2021). Carbon contents and fine root production in tropical silvopastoral systems. *Land Degradation & Development*, 32: 738– 756. <https://doi.org/10.1002/ldr.3761>
- Ordoñez J.A.B. y Maser O. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*, Vol. 7, núm. 1, primavera, 2001, pp. 3-12
- Rodríguez L.R., Jiménez P.J., Calderón A., Treviño G.E.J. y Razo Z.R. 2009. Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la reserva de la Biosfera el cielo, Tamaulipas, México. *Ra Ximhai*. 5 (2) 317-327.
- Sánchez-Silva, S., De Jong, B. H., Aryal, D. R., Huerta-Lwanga, E., & Mendoza-Vega, J. (2018). Trends in leaf traits, litter dynamics and associated nutrient cycling along a secondary successional chronosequence of semi-evergreen tropical forest in South-Eastern Mexico. *Journal of Tropical Ecology*, 34(6), 364-377.
- Senior, R. A., Hill, J. K., & Edwards, D. P. (2019). Global loss of climate connectivity in tropical forests. *Nature Climate Change*, 9(8), 623-626.
- Traversa T. I.P. y Alejano M.M.R. 2013. Caracterización, distribución y manejo de los bosques nativos en el norte de Uruguay. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 84: 249-262
- UNFCCC. 2007. Unidos por el clima. Guía de la convención sobre el cambio climático y el protocolo de Kyoto.
- Vitousek P.M. 1985. Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests. *Department of Biology.. Ecological Society of America* 65 (1). Pp. 285-298.