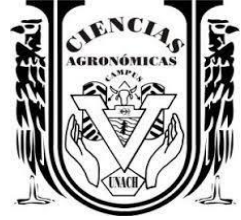




**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
CAMPUS V**



**Distribución de carbono orgánico del sistema milpa intercalado
con árboles frutales en Ocozocoautla, Chiapas, México**

TESIS

**Que para obtener el grado de maestro en
CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL**

Presenta

Miguel Angel Ramos Pérez L090089

Director de tesis

Dr. Deb Raj Aryal

Villaflores, Chiapas, México

Abril, 2024

Villaflores, Chiapas
24 de abril de 2024
Oficio N° FCACV/D/0355/24

C. MIGUEL ÁNGEL RAMOS PÉREZ
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: **“Distribución de carbono orgánico del sistema milpa intercalado con árboles frutales en Ocozocoautla, Chiapas, México”**, 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 Y LA NECESIDAD DE SERVIR”


FACULTAD DE
CIENCIAS AGRONÓMICAS
UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE CHIAPAS
DIRECCIÓN
M. C. CARLOS ALBERTO VELÁZQUEZ SANABRIA
DIRECTOR

C. c. p. Archivo

CAVS*marh.





Código: FO-113-05-05

Revisión: 0

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

El (la) suscrito (a) Miguel Angel Ramos Pérez,
Autor (a) de la tesis bajo el título de “Distribución de carbono orgánico del sistema milpa intercalado con árboles frutales en Ocozocoautla, Chiapas, México”
presentada y aprobada en el año 2024 como requisito para obtener el título o grado de Maestro en Ciencias en Producción Agropecuaria Tropical, autorizo licencia a la Dirección del Sistema de Bibliotecas Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH), para que realice la difusión de la creación intelectual mencionada, con fines académicos para su consulta, reproducción parcial y/o total, citando la fuente, que contribuya a la divulgación del conocimiento humanístico, 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 del Ciencia y Tecnología (CONACYT), podrán consultarse en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Chiapas (RIUNACH).

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a los 26 días del mes de abril del año 2024.

Miguel Ángel Ramos Pérez

Nombre y firma del Tesista o Tesistas

Dedicatorias

A Cecilia, mi esposa, por ser mi cómplice en todo, por apoyarme, motivarme y enseñarme a resistir y a mejorar como persona. Gracias por sacrificar parte de tu tiempo, en mí ausencia has sabido ser padre y madre a la vez en el cuidado de nuestra hija. Esto es parte de tus triunfos. Dios te ha de premiar por ser como eres.

A mi amada hija, Alexandra, por llenarme de alegría y pensamientos buenos al regresar de cada jornada. Gracias por ser buena estudiante, demostrar tu valentía y madurez en todos estos años que la distancia nos separa, pero nunca el amor. Gracias por enseñarme el amor incondicional.

A mis padres, Blanca Marilú y Angel quienes, son las únicas personas incondicionales, que me han brindado esta maravillosa vida, me han visto triunfar, me han visto fallar, me han aconsejado, pero siempre han estado a mi lado. Gracias por darme una buena educación y enseñarme que no hay imposibles cuando se persevera.

Agradecimientos

Primeramente, quiero agradecer a Dios, por permitirme disfrutar de este proyecto de vida a lado de mi familia y estar acá compartiendo este logro con los amigos y todo aquel que quiera consultar este documento. Este proyecto es el esfuerzo de muchas personas e instituciones.

A mi director de tesis, el Dr. Deb Raj Aryal, gracias por guiarme con profesionalismo como investigador, por la libertad con la que pude desarrollar mi trabajo de investigación, sin escatimar tiempo y esfuerzo, al ser un excelente consejero. Por eso, este logro también es en buena parte suyo. Al Dr. Robertony Camas Gómez, excelente profesor y codirector. Gracias por su amistad y contribuir con sus sugerencias para la realización del trabajo de campo. Al Dr. Francisco Guevara Hernández, René Pinto Ruíz y Manuel Alejandro La O Arias por su experiencia y consejos para la finalización de este producto. Agradezco al instituto del INIFAP, por permitirme realizar este estudio de investigación en sus parcelas experimentales, a mis amigos que ayudaron en momentos especiales como: M.C. Lucy, Danilo, Juan Carlos, Oliver, Viviana, Magdiel y a todos aquellos que hicieron posible la realización de este proyecto, mis más sinceros agradecimientos.

Agradezco a la Maestría en Ciencias en Producción Agropecuaria Tropical (MCPAT) y la Facultad de Ciencias Agronómicas (FCA) de la UNACH por los recursos destinados a mi formación y por permitirme realizar mis estudios de maestría en Ciencias, mismos que me permitieron tener una experiencia y acercamiento con otras instituciones nacionales, cuyo trabajo y compromiso motivaron el desarrollo de este proyecto. Agradezco también al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de quién fui becario (CVU: 879827) durante el periodo 2021-2023. Asimismo, agradezco al Cuerpo Académico de Agroforestería Pecuaria de la FCA por el apoyo que me brindaron durante todo mi proceso de formación. Al Dr. Deb Raj Aryal (director de esta tesis) por todo el apoyo y acompañamiento en todo mi proceso formativo y desarrollo del proyecto de investigación.



FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS CAMPUS V
Agroforestería Pecuaria



Esta tesis titulada **Distribución de carbono orgánico del sistema milpa intercalado con árboles frutales en Ocozocoautla, Chiapas, México**, fue realizada por el Ing. Miguel Angel Ramos Pérez, bajo la dirección del Dr. Deb Raj Aryal.

Se incluye en la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento (LGCA) del Cuerpo Académico Consolidado en Agroforestería Pecuaria.

Se incluye en la Línea de Generación y Aplicación de Conocimiento (LGCA) del Programa de Maestría en Ciencias en Producción Agropecuaria Tropical (MCPAT) de la UNACH.

Villaflores, Chiapas, México, abril 2024

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	i
ÍNDICE DE TABLAS.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS	ii
RESUMEN	iii
1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1.- Objetivo general.....	2
1.2.- Objetivos específicos	2
2.- REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1.- Gases de efecto invernadero	3
2.2.- Ciclo de carbono	3
2.3.- Captura de carbono	4
2.4.- Captura de C en el suelo	4
2.5.- Tipos de sistemas de producción agrícola	5
2.5.1.- Pastizal	5
2.5.2.- Sistemas agroforestales.....	5
2.5.3.- Agroecosistema MIAF	6
2.6.- Diseño del agroecosistema	7
3.- MATERIALES Y MÉTODOS	9
3.1.- Área de estudio.....	9
3.2.- Trazabilidad de la parcela	10
3.3.- Manejo agronómico	11
3.4.- Diseño experimental	11
3.5.- Generalidades.....	12
3.6.- Fases del proyecto.....	12
3.7.- Primera fase.....	13
3.8.- Obtención de raíces finas	14
3.9.- Segunda fase.....	15
3.9.1.- Determinación de densidad aparente	15
3.9.2.- Análisis químico para la evaluación de carbono orgánico.....	16
3.10.- Análisis de datos.....	17

4.- RESULTADOS	18
4.1.- Distribución de biomasa radicular	18
4.2.- Propiedades del suelo	22
4.3.- Distribución de carbono orgánico en el suelo	27
5.- DISCUSIÓN	29
5.1.- Relación de biomasa radicular y parámetros del suelo.....	29
5.2.- Carbono orgánico y propiedades del suelo.....	30
6.- CONCLUSIONES.....	31
7.- REFERENCIAS.....	32

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Variables evaluadas en la distribución de raíces finas	15
Cuadro 2. Variables evaluadas en la captura de CO y propiedades fisicoquímicas del suelo.....	17

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Efecto de los sistemas en la producción total de biomasa radicular ≤ 2 mm	18
Tabla 2. Efecto del MIAF en la distribución de biomasa radicular ≤ 2 mm. Análisis de varianza del efecto de la inclinación, distancia, profundidad e interacciones en el sistema milpa intercalada con árboles frutales.	19
Tabla 3. Biomasa de raíces finas con un diseño factorial de múltiples niveles, en $g\ m^{-3}$, área ocupada por el sistema MIAF.....	20
Tabla 4. Densidad aparente expresada en $g\ m^{-3}$ en diferente inclinación, distancia y profundidad del árbol.....	22
Tabla 5. Efecto del MIAF en la distribución de COS. Análisis de varianza del efecto de la inclinación, distancia, profundidad e interacciones en el sistema milpa intercalada con árboles frutales.....	27
Tabla 6. Carbono orgánico en % de 250 miligramos de suelo del sistema MIAF. 27	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Municipio de Ocozocoautla de espinosa y área de estudio.....	9
Figura 2. Diseño del agroecosistema MIAF.....	10
Figura 3. Diseño de muestreo de una sub-parcela MIAF	13
Figura 4. Diseño de muestreo de suelo raíces fina en pastizal	14
Figura 5. Nucleador cubico de 9000 cm ³	14
Figura 6. Biomasa (g m ⁻³) de raíces finas (≤ 2 mm) en el sistema MIAF y el pastizal a diferentes profundidades. Las barras de error indican los 95% de intervalos de confianza.....	18
Figura 7. Gráficos de regresión en biomasa radicular a diferentes profundidades del sistema MIAF y pastizal.....	21
Figura 8. Distribución de raíz leñosa y fibrosa del sistema MIAF a diferentes profundidades.....	21
Figura 9. Gráfico 3D de oblea, raíz leñosa y fibrosa (≤ 2 mm) del sistema MIAF presentado a colores en g m ⁻³ excluye al pastizal los números negativos representa la inclinación en contra del árbol.....	22
Figura 10. Gráficos de barras, pH a diferentes inclinaciones, distancias y profundidades incluyendo al pastizal.....	24
Figura 11. Gráficos de barras de Eh (mV) a diferentes inclinaciones, distancias y profundidades incluyendo al pastizal.....	26
Figura 12. Gráfico de columna distribución de CO en % de 250 miligramos de suelo para los dos sistemas a diferentes profundidades.....	28

RESUMEN

Los sistemas agroforestales podrían contribuir en la mitigación del cambio climático a través de la captura y almacenamiento de carbono en biomasa arbórea y en suelo. El presente proyecto planteó evaluar la captura de carbono orgánico en el suelo (COS) y la distribución de raíces finas del sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) comparado con un pastizal. El trabajo de investigación se llevó a cabo en el Campo Experimental Centro de Chiapas del INIFAP en Ocozocoautla, Chiapas, México¹. El muestreo de suelo y de raíces finas se realizó a una profundidad de medio metro durante el periodo primavera-verano. Para establecer la relación entre los parámetros del suelo y raíces finas se realizó el análisis estadístico de correlación y regresión lineal. La biomasa de raíces finas (\leq a 2 mm) en los sistemas mostró diferencia estadística ($F = 32.31$, $p = 0.000$). El MIAF obtuvo una media de 220.8 g m^{-3} con intervalo de confianza de $156.1 - 285.6 \text{ g m}^{-3}$; mientras que el pastizal obtuvo una media de 713.0 g m^{-3} con intervalo de confianza de $555.0 - 872.0 \text{ g m}^{-3}$. El porcentaje de COS en el suelo no presentó diferencia estadística entre sistemas ($F = 0.25$, $p = 0.621$). Sin embargo, el sistema MIAF muestra diferencia estadística a diferentes distancias de la hilera de árboles ($F = 20.80$, $p = 0.000$). A una distancia de 80 cm de la hilera de árboles, el COS es mayor con media de 2.3 % con intervalo de confianza de 2.1 - 2.5 % en comparación de 160 y 300 cm de distancia. La distribución del COS a diferentes profundidades del suelo también muestra una diferencia estadística ($F = 4.76$, $p = 0.001$), con mayor valor a 0 - 10 cm con media de 2.2 % con intervalo de confianza de 1.9 - 2.5 % en comparación de 30 - 50 cm. El MIAF tiene mayor acumulación de COS que el pastizal a profundidades de 30 - 50 cm con media de 1.6 % COS, esto se debe a la distribución de raíces finas en horizontes más profundos del suelo. El lugar de mayor presencia radicular se encuentra en el área de goteo a 80 cm del árbol. El pastizal acumula un 55 % del total de COS en los primeros 20 cm y el MIAF un 46 % en los primeros 20 cm de profundidad. Este comportamiento se debe a la buena distribución radicular a diferentes profundidades en el MIAF, el cual contribuye a la captura de carbono a mayor profundidades del suelo. Los resultados podrían ser

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

útiles en conocer la contribución del sistema agroforestal MIAF en mitigación de CO₂ atmosférico, a través de fijación y acumulación de carbono en los suelos.

Palabras clave: *biomasa radicular; carbono orgánico del suelo; MIAF; pastizal nativo; raíces finas; sistemas agroforestales*

Abstract

Agroforestry systems could contribute to climate change mitigation through the capture and storage of carbon in tree biomass and soils. This project aimed to evaluate soil organic carbon (SOC) sequestration and fine root distribution of an agroforestry system, Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF), compared to a native grassland. The research work was carried out at the Experimental Field of INIFAP in Ocozocoautla, Chiapas, Mexico. Sampling of soil and fine roots was carried out to a depth of 50 cm during the spring-summer period. To assess the relationship between soil parameters and fine root biomass, correlation and linear regression analyses were performed. The biomass of fine roots (≤ 2 mm) showed a statistical difference ($F = 32.31$, $p < 0.01$) between MIAF and native grassland. MIAF showed a mean of 220.8 g m^{-3} with a confidence interval of $156.1 - 285.6 \text{ g m}^{-3}$; while grassland showed 713.0 g m^{-3} with a confidence interval of $555.0 - 872.0 \text{ g m}^{-3}$. The percentage of SOC showed no statistical difference between systems ($F = 0.25$, $p = 0.621$). However, the MIAF system showed statistical differences at different distances from the tree row ($F = 20.80$, $p < 0.01$). At a distance of 80 cm from the tree row, SOC is higher with a mean of 2.3 % with a confidence interval of 2.1 - 2.5 % compared to 160 and 300 cm distances. The distribution of SOC at different soil depths also showed a statistical difference ($F = 4.76$, $p < 0.01$), with a higher value at 0 - 10 cm with a mean of 2.2 % (confidence interval of 1.9 - 2.5 %) compared to 30 - 50 cm. The MIAF has higher SOC accumulation than the pasture at deeper soil layer (30 - 50 cm) with a mean of 1.6 % SOC, due to a greater distribution of fine roots in deeper soil horizons. The place with the highest root presence is in the drip

area at 80 cm from the tree row. Grassland accumulates 55 % of the total SOC in the first 20 cm and MIAF 46 % in the first 20 cm depth. This behavior is due to the good root distribution at different depths in the MIAF, which contributes to carbon sequestration at greater soil depths. The results could be useful to know the contribution of the MIAF agroforestry system in the mitigation of atmospheric CO₂, through carbon fixation and accumulation in soils.

Keywords: root biomass; soil organic carbon; MIAF; native grassland; fine roots; agroforestry systems

1.- INTRODUCCIÓN

Los sistemas de producción agropecuaria emiten a nivel mundial 1.6 gigatoneladas de carbono (GtC) por año por diferentes actividades, incluyendo el cambio de uso de suelo (Friedlingstein *et al.*, 2020). Una de las alternativas para mitigar las emisiones de carbono en sector agropecuario es la implementación de sistemas agroforestales. Los sistemas agroforestales (SAF) brindan múltiples servicios ecosistémicos, teniendo gran potencial en la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) como bióxido de carbono (CO₂) (Sarandón, 2002); considerando a estas actividades una alternativa para la captura de carbono orgánico (CO) atmosférico.

El sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF), es un sistema agroforestal (SAF) que combina la producción intensiva de árboles frutales y la milpa tradicional (maíz y frijol), considerado como un sistema multipropósito para la intensificación del manejo sustentable, que es compatible con el paradigma de la agricultura tradicional de México (Turrent-Fernández *et al.*, 2017 y Camas-Gómez *et al.*, 2018). El sistema MIAF contribuye en la conservación del suelo formando terrazas de manera natural y permite mayor eficiencia en el uso del suelo, radiación solar fotosintéticamente activa y agua, (Cadena-Iñiguez *et al.*, 2018 y Regalado *et al.*, 2020). El área foliar de este sistema captura aproximadamente 0.75 Mg C ha⁻¹ por año; sin embargo; es necesario conocer su contribución en captura de COS y su distribución de raíces finas (\leq a 2 mm) de todos los cultivos a diferentes profundidades. Ya que contribuyen en la acumulación de carbono al suelo por el recambio constante que sufren debido al estrés biótico y abiótico (Morales-Ruiz, 2020). El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la captura de COS a diferentes distancias del árbol tanto horizontal como vertical y la distribución de raíces finas (\leq a 2 mm) de los componentes del sistema MIAF; Guayaba (*Psidium guajava* L.), Maiz (*Zea mays* L.) y Frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) comparado con un pastizal con suelo de origen sin disturbios en los distintos horizontes en Ocozocoautla, Chiapas, México. La investigación se realizó con un enfoque cuantitativo y descriptivo de tipo experimental. Se propone evidenciar el almacenamiento de carbono en suelo y raíces finas siendo las partes menos

estudiadas del agroecosistema MIAF, para comprender los factores que controlan el almacenamiento de carbono y mejorar las estrategias de mitigación del cambio climático.

Planteamiento del problema

Se desconoce la contribución del agroecosistema MIAF en captura de carbono orgánico en suelo y raíces finas para mitigar el cambio climático, por lo que, se requiere su evaluación.

Preguntas de investigación

- a) ¿Qué cantidad de carbono orgánico en el suelo es capturado en el sistema MIAF comparado con un pastizal?

- b) ¿Cómo se distribuyen las raíces finas en las hileras alternas de maíz y frijol intercalados en árboles frutales del sistema MIAF comparado con el pastizal?

1.1.- Objetivo general

Evaluar la captura de carbono orgánico en el suelo y la distribución de raíces finas del sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) comparado con un pastizal sin manejo agronómico.

1.2.- Objetivos específicos

- a) Cuantificar el almacenamiento de carbono orgánico en el suelo y su distribución tanto vertical como horizontal en el suelo del sistema MIAF
- b) Analizar la distribución de raíces finas a diferentes distancias del árbol frutal y profundidades del suelo del sistema MIAF.

2.- REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.- Gases de efecto invernadero

La agricultura es el sustento alimenticio de una población creciente por ello es la cuarta causa de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En México la información de las emisiones de GEI se reporta en diversos foros y desde diferentes perspectivas (Saynes-Santadillán *et al.*, 2016).

Los GEI son nombrados así porque, son semejantes al funcionamiento de un invernadero, conducen al aumento de la temperatura de la superficie de la tierra al interactuar con la energía que proviene del sol. Aunque la manera de retener el calor de un invernadero es fundamentalmente diferente a como funcionan los gases de efecto invernadero, la analogía ha perdurado y a su efecto se le denomina efecto invernadero (INECC, 2022).

Estas emisiones de los GEI en el contexto del cambio climático global, está presente en la preocupación del debate científico y político a nivel mundial. Los GEI son constituyentes de la atmósfera, capaces de absorber parte de la radiación infrarroja y reemitir radiación del mismo tipo en todas las direcciones hacia la superficie de la tierra y a la misma atmósfera. Evidenciando el aumento de temperatura terrestre (IPCC, 2009).

De tal forma el efecto invernadero provocado por los gases que son emitidos hacia la atmósfera hace que la temperatura del planeta se incremente y se estima que durante los próximos veinte años experimentaremos un aumento de la temperatura media global de 1.5 °C que no podrá evitarse provocando efectos en cascada de múltiples episodios extremos (IPCC, 2022).

Los agroecosistemas también tienen un gran potencial de mitigación de GEI cuando se conservan los residuos de cosecha, se reduce la labranza y se introducen cultivos de cobertura. Con el hecho de capturar y retener el carbono ayuda a la mitigación del cambio climático, ya que reduce el contenido de CO₂ de efecto invernadero en la atmósfera (del Cisne, 2021).

2.2.- Ciclo de carbono

Los ecosistemas terrestres son la vía más importante del flujo de carbono (C) atmosférico a la vegetación y el suelo de forma biológica, por medio de la

fotosíntesis, contribuyendo a la atmósfera, mediante su descomposición. Este flujo involucra muchos procesos interactuantes, los cuales mantienen el equilibrio dinámico del intercambio de gases, atmósfera, planta y suelo. Como se mencionó anteriormente, la deforestación puede afectar este equilibrio dinámico de intercambio de gases, por lo que es muy importante conocer cuáles son los mecanismos que lo controlan (Soto-Pinto y Jiménez-Ferrer, 2018).

2.3.- Captura de carbono

La vegetación es la encargada de incorporar el C atmosférico al ciclo biológico por medio de la fotosíntesis. Los bosques del mundo (templados y tropicales) capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre y participan con el 90% del flujo anual de carbono entre la atmósfera y el suelo. De igual manera, el suelo juega un papel muy importante en el reciclaje y almacén del carbono en estos ecosistemas. Como ejemplos de la influencia global de los procesos del suelo están los productos de la desnitrificación, tales como N_2O y nitrógeno (N_2), así como los producidos por la descomposición de la materia orgánica del suelo, como el CO_2 , CH_4 y otros gases asociados al ciclo del C (Forero *et al.*, 2018).

Es por ello, que el término captura de C, tal como lo emplea el Protocolo de Kioto, se usa para indicar almacenamiento de C por periodos prolongados (FAO, 2010). Se refieren al C que es capturado por organismos autótrofos y utilizado en su metabolismo para la construcción de esqueletos hidrocarbonatados. Así mismo, es un término utilizado para indicar la cantidad de CO_2 capturado de la atmósfera por las plantas y que permanece como C orgánico después de la biodegradación de la materia orgánica o aquella parte de este C que queda temporalmente fuera del ciclo, en productos maderables (Segura-Madrigal *et al.*, 2020).

2.4.- Captura de C en el suelo

La captura de C por el suelo se efectúa en los ecosistemas forestales mediante el intercambio de C con la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración, llevando al almacenamiento en la biomasa y en el suelo. La producción y descomposición de hojarasca y raíces son mecanismos principales de adición de carbono orgánico en el suelo. La calidad del suelo es una herramienta de valoración que facilita la aplicación de prácticas de manejo que promuevan sistemas

agronómicos sostenibles constituyendo al estado de sus propiedades dinámicas como el contenido de materia orgánica, la diversidad de organismos o los productos microbianos en un tiempo particular y otros, llamados indicadores de la calidad del suelo (León *et al.*, 2020). La importancia de los sistemas agroforestales en la captura de carbono se resume en dos conceptos: el primero es que los árboles se convierten en sumideros de carbono a largo plazo y el segundo es que reducen la necesidad de deforestar nuevos bosques para una agricultura migratoria deficiente (Clemente-Arenas, 2021).

2.5.- Tipos de sistemas de producción agrícola

La producción agrícola está basada en ecosistemas modificados por el hombre, en donde existen diversas formas de manejo de los sistemas y agroecosistemas existentes, desde los inicios de la agricultura, el cambio de paisaje da como resultado nuevos sistemas de manejo entre los cuales tenemos, agrícolas, forestales, pecuarios y sus combinaciones que han dado como resultado técnicas regionales para la aplicación del conocimiento en la agricultura (Frickel y Moore, 2006 y Bello-Baltazar., 2012).

2.5.1.- Pastizal

Los pastizales naturales cubren el 54% de la superficie del planeta, pero solo el 10% de los planes climáticos incluye referencias a estos ecosistemas, constituyendo el bioma terrestre con biodiversidad y servicios ecosistémicos de mayor riesgo a escala mundial por su vulnerabilidad en los cambios de uso suelo y la ganadería al cambiar la estructura vegetal aun sabiendo, que juega un papel clave en el almacenamiento de carbono (Geymonat, 2018). Al vincular la estructura con el funcionamiento de los pastizales permite mejorar su conservación y uso de los pastizales. Pero la diferencia en la estructura de la vegetación puede describirse a través de un modelo de transición, pero no están asociadas a las diferencias en el funcionamiento (Ludeiro, 2023).

2.5.2.- Sistemas agroforestales

Los sistemas agroforestales son catalogados como sistemas productivos que representan una solución, sin embargo, su definición es amplia y varía de acuerdo al punto de vista de quien la ha experimentado. Convencionalmente la

agroforestería se ha usado para mejorar los sistemas pecuarios (Benedetti-Ruiz y Espinoza R., 2018). En la búsqueda de contrarrestar la baja rentabilidad de la agricultura convencional y sus efectos negativos en la degradación del suelo, por diferentes factores, como quemas no controladas y sobrepastoreo. El INIFAP está evaluando especies forrajeras tanto de especies nativas como introducidas en el centro de Chiapas. (Quero-Carrillo et al., 2007).

En el estado de Chiapas, las emisiones de gases de efecto invernadero han aumentado especialmente por la conversión de tierras forestales a pastizales y al estiércol del ganado (Alayon-Gamboa *et al.*, 2016). La remoción de CO₂ atmosférico se pueden reducir con actividades forestales y agroforestales dentro de las unidades de producción. Los sistemas agroforestales poseen gran cantidad de almacenamiento de carbono en sus distintos reservorios, obteniendo mayor almacenamiento de carbono en biomasa viva y raíces de árboles que en potreros por el alto número de individuos asociados en el sistema (Aryal *et al.*, 2018).

El estudio de sistemas agroforestales y almacenamiento de carbono en comunidades indígenas de Chiapas, demuestran que la complejidad de los sistemas taungya, barbecho natural y barbecho enriquecido incrementan el carbono en los reservorios de materia orgánica muerta y biomasa viva mientras que en la milpa tradicional disminuye con la edad, se espera que el barbecho enriquecido en su madurez iguale al barbecho natural en cuanto a su acumulación de carbono (Roncal-García *et al.*, 2008).

2.5.3.- Agroecosistema MIAF

Se ha propuesto el agroecosistema milpa intercalado con árboles frutales (MIAF) como una tecnología multiobjetivo, para las pequeñas unidades de producción, ya que es considerado como una vía de solución que permite el manejo de agroecosistemas productivos sostenibles y resilientes (Cadena-Iñiguez *et al.*, 2018 y Turrent-Fernández *et al.*, 2017). Entre los beneficios del agroecosistema MIAF se puede identificar la diversidad de cultivos asociados lo que permite mejorar la seguridad alimentaria familiar, de manera que si algún cultivo del sistema MIAF sufre pérdidas se tienen otras especies para satisfacer las necesidades de la familia (Regalado *et al.*, 2020).

Como también reduce el efecto invernadero en los filtros de escurrimiento por la formación de terrazas, con residuos de cosecha y podas de los árboles frutales, donde se acumula una gran cantidad de materia orgánica que permite la filtración de agua, acumulando mayor humedad y C dependiendo de la inclinación de la parcela teniendo resultados muy similares a los sistemas forestales. (Hernández-López, 2014)

Así mismo las terrazas formadas por el material vegetal acumulado en los árboles no afectan a la calidad del fruto ni incrementan la producción de los árboles frutales pero si influye en el incremento de la producción para los cultivos anuales (Hernández-Escobar, 2022). Siendo técnicamente eficientes para contrarrestar la erosión en laderas con altas precipitaciones (Camas-Gómez et al., 2018). Por lo tanto, el MIAF incrementa las propiedades químicas y biológicas en ciertos sectores de la parcela o se mantienen relativamente constantes, la diversidad metabólica y la diversidad de microorganismos son excelentes indicadores de fertilidad en el suelo, mostrando cambios favorables en la producción agrícola (Arriaga-Vázquez et al., 2020).

La distribución de raíces del sistema MIAF son favorecidos al establecerse en franjas por la captación de radiación fotosintéticas, favoreciendo a la exploración radicular en diferentes estratos del suelo principalmente de forma horizontal dependiendo de la especie y a su madurez fisiológica en comparación de cultivos simples (Albino-Garduño et al., 2015).

Por lo tanto contribuye en las microcuencas como corredores biológicos brindando hábitat para las aves y otras diversas especies, conservando la cobertura vegetal en periodos de estiaje generando nuevos paisajes agrícolas con beneficios ecosistémicos y soporte a la agricultura (Martinez, 2018).

2.6.- Diseño del agroecosistema

En terrenos con pendiente menor a 20%, el módulo MIAF típico consiste de tres franjas de 4.8 m de ancho cada una. La franja central está ocupada por árboles frutales y las franjas laterales por el maíz o frijol en seis surcos de 0.80 m de distancia entre surcos. Estos se plantan con una separación de 1 m entre árboles, en la parte media de la franja central. De esta manera, el primer surco de la especie

anual deberá quedar a una distancia de 2.8 m del tronco de los árboles frutales en ambos lados de las franjas. La repetición de este módulo a lo ancho en el terreno, da lugar al diseño de 12 surcos de maíz y frijol, intercalados en hileras de árboles frutales separadas a 14.4 m. Cada especie ocupa una tercera parte de terreno. Los árboles frutales con una densidad de plantación de 667 árboles por hectárea, son acotados a la anchura de su franja (4.8 m), mediante el sistema de conducción y poda tipo Tatura, permitiéndole una altura al árbol de solamente 3 metros. En laderas con pendiente entre 20% y 40%, el módulo MIAF consiste de una anchura total de 10.6 m, la cual está dividida en tres franjas, una franja central de 4.2 m ocupada por los árboles frutales y una a cada lado donde se siembran los cultivos básicos (Hernández-Lopez, 2015).

3.- MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.- Área de estudio

Este estudio se realizó en el Campo Experimental Centro de Chiapas, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en Ocozocoautla, Chiapas, México. Se localiza entre las coordenadas geográficas 16°47'09"N y 93°24'04"W a 793 m s.n.m. Establecido sobre un suelo Vertisol Pélico, de características muy oscuras en los primeros 30 cm en húmedo (CEIEG, 2012). Según García, (2004) es de clima Aw1, que corresponden a un clima cálido subhúmedo con lluvias tan solo en verano y la precipitación normal anual es de 989 mm. El período de mayor índice de lluvias es de junio a septiembre con un periodo de sequía intraestival de 21 días de la segunda quincena de julio a la primera de agosto, sin embargo, de octubre a enero existen precipitaciones por los frentes fríos (SIAP, 2022) (Fig. 1).

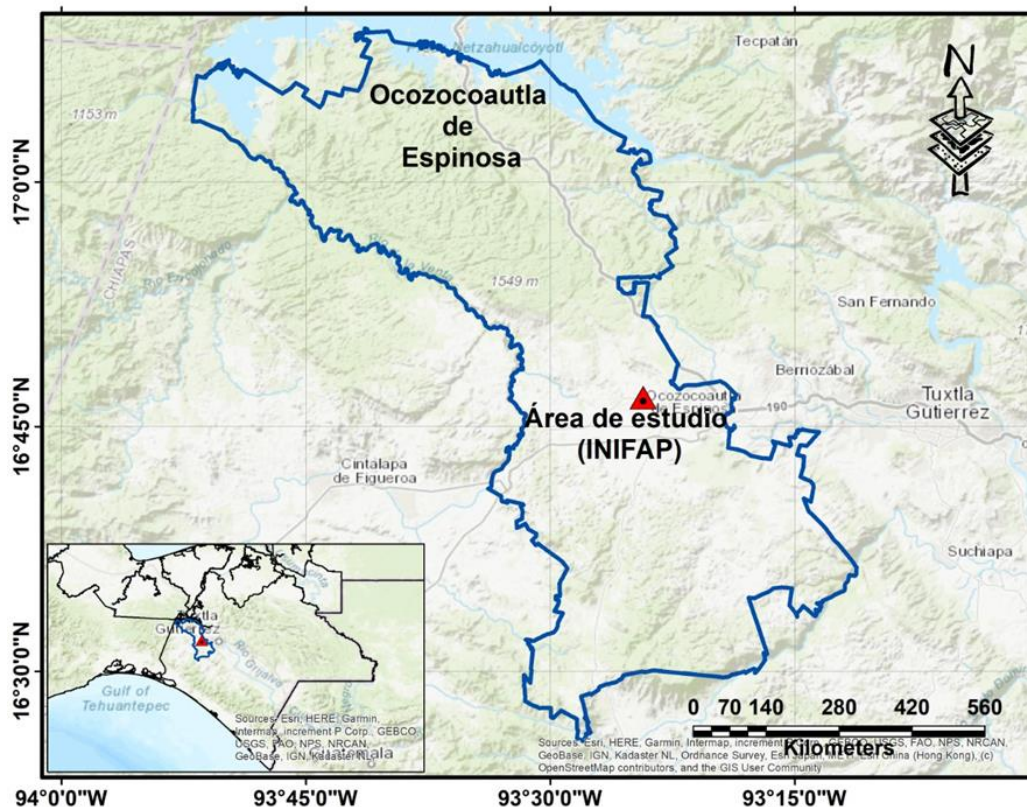


Figura 1. Municipio de Ocozocoautla de espinosa y área de estudio (Fuente: elaboración propia)

3.2.- Trazabilidad de la parcela

La parcela consistió de tres módulos de sistema MIAF, establecidas en el año 1997. Un módulo consiste en una franja de 14.4 m de ancho, dividida en tres sub-franjas de 4.8 m cada una. En la parte media de la sub-franja central, permanece establecido como cultivos perenes árboles de guayaba (epicultivo) a cada metro de distancia; en las dos sub-franjas laterales se sembraron de forma alternada dos hileras de maíz (mesocultivo) y dos de frijol (sotocultivo), con una separación de 0.8 m entre ellas, con un total de 6 hileras de maíz y frijol. De esta manera, el maíz, frijol y el frutal ocuparon cada uno un tercio de hectárea.

Debido a la proximidad entre árboles de guayaba en la hilera, la conducción y poda del árbol fue bajo los principios del sistema Tatura modificado (Camas-Gómez, 2011). Dejando la rama central o primaria como líder, direccionándola de manera alternada un árbol a la derecha y otro árbol a la izquierda para aprovechar la mayor radiación solar fotosintéticamente activa. Las ramas laterales o secundarias se dirigen lateralmente con respecto al líder, adquiriendo la estructura del árbol una forma de palma. Las filas están direccionadas de norte a sur como se muestra en la (Fig.2) Este croquis debemos modificarlo.

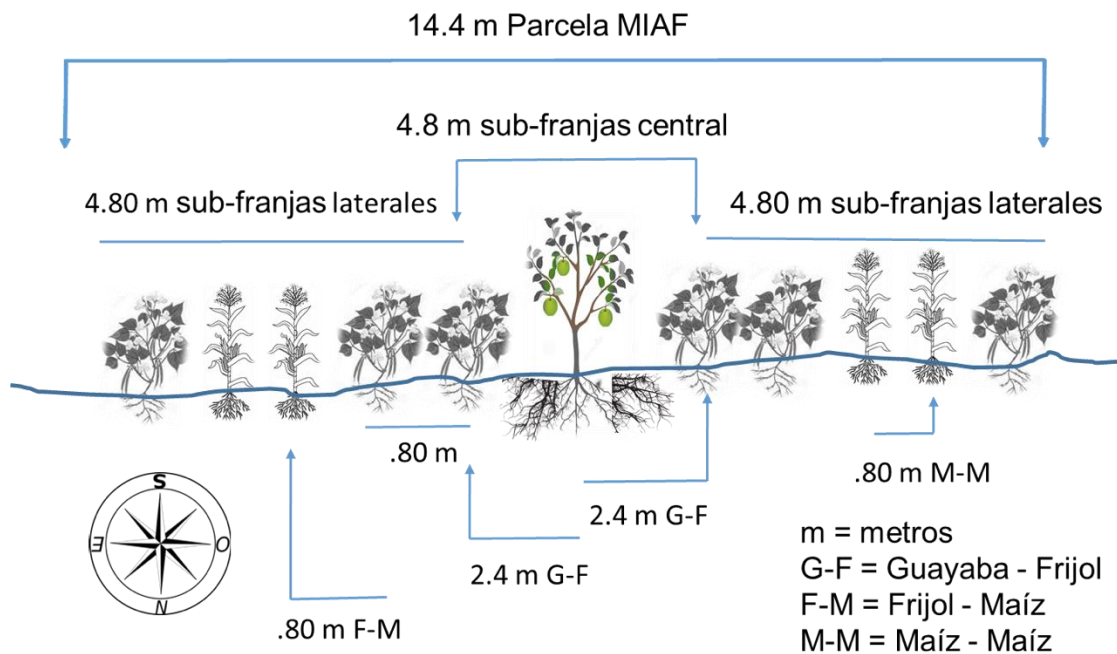


Figura 2. Diseño del agroecosistema MIAF
(Fuente: elaboración propia)

3.3.- Manejo agronómico

Para el frutal se utilizó la variedad Guayaba Pera producida clonalmente. Para maíz el criollo Parraleño y el frijol la variedad Sangre Maya.

Frutal: A los árboles de guayaba se le realizaron podas de rejuvenecimiento, sanidad y fructificación.

Maíz y frijol: La preparación del suelo se realizó convencionalmente con dos rastreos a una profundidad de 10 a 12 cm.

Se sembraron manualmente 83,333 semillas ha^{-1} de maíz criollo Parraleño y 250,000 semillas ha^{-1} de frijol Sangre Maya. Para maíz se aplicó una fertilización básica con 150 kg de nitrógeno (N) ha^{-1} y 60 kg de K_2O_5 ha^{-1} . Para frijol 20 kg de nitrógeno ha^{-1} y 40 kg de K_2O_5 ha^{-1} usando como fuentes urea y cloruro de potasio. En el maíz, el N se aplicó el 20% a la siembra, 40% en V5 y 40% en V10. Todo el K_2O_5 se aplicó de manera conjunta con la primera aplicación de N. En el frijol todo el fertilizante recomendado se aplicó a la siembra. En todos los casos se taparon los fertilizantes. Se brindó eficiente control de malezas y plagas.

3.4.- Diseño experimental

La presente investigación es de tipo experimental y descriptiva. Se estableció con el diseño factorial de múltiples niveles utilizando la siguiente fórmula $y_{ijk} = M + I_i + D_j + P_k + e_{ijk}$ los tres arreglos factoriales son 2 inclinaciones* 3 distancias* 5 profundidades sumando un total de 30 tratamientos con cuatro repeticiones donde y_{ijk} = Variable de Media estándar en i ésima j ésima k ésima y relación de las mismas; M = Media General; I_i = Efecto de i ésima inclinación; D_j = Efecto de j ésima distancia; P_k = Efecto de k ésima profundidad y e_{ijk} = interacción del error estándar.

Dentro del sistema MIAF, los tratamientos fueron conformados por dos inclinaciones del árbol a favor y en contra de la sub-franja de maíz y frijol, a tres distancias de la del frutal a 80, 160 y 300 cm y cinco profundidades de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 y 40-50 cm.

Para el pastizal se utilizó el diseño factorial de un solo nivel utilizando la misma fórmula que el sistema MIAF, el único factor son 5 profundidades en 4 puntos dirigidos por conveniencia sumando un total de 5 tratamientos con 4 repeticiones.

Dentro del pastizal el tratamiento se conformó por las cinco profundidades de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 y 40-50 cm.

3.5.- Generalidades

Para la selección de los puntos de muestreo se tomó en cuenta el manejo agronómico y estructura de los árboles en dos sub-parcelas con la misma cantidad de árboles en una superficie de 30 m lineales, con altura y distancia de inclinación homogénea del sistema MIAF y un pastizal. La recolección de muestras de suelo y de raíces finas se realizó en puntos dirigidos por conveniencia en el MIAF y el pastizal asegurándose que sea equitativa y proporcional según la Editorial Grudemi (2019). El proceso constó de dos fases, con sus respectivas variables inclinación, distancia del tronco del árbol y profundidad del suelo.

El tamaño óptimo de la muestra, que permitió el balance adecuado entre el costo del muestreo y la precisión obtenida evitó la sobre estimación (sobre-gasto de recursos) o subestimación (precisión no adecuada), consistió de tres factores según (Kogan, 1988).

- I. La cantidad de recursos disponible
- II. El grado de confiabilidad cm^3
- III. El tipo de dispersión espacial tomando en cuenta la metodología de (Southwood, 1978).

3.6.- Fases del proyecto

- En la primera fase, se analizó la distribución de las raíces finas de Guayaba como leñosas y fibrosas (maíz, frijol y malezas) en las hileras del sistema MIAF comparado con un pastizal.
- En la segunda fase, se cuantifico el almacenamiento de COS y su distribución espacial en el suelo a tres distancias del árbol y a cinco profundidades en el MIAF y solo en cinco profundidades en pastizal.

3.7.- Primera fase: Para el muestreo de suelo, en las dos sub-parcela del sistema MIAF, se tomaron en dos direcciones a favor y en contra de la inclinación del árbol, obteniendo seis puntos en cada lado de la franja de árboles, dos dentro de la copa a 80 cm del tallo del árbol, dos sobre la copa a 160 cm del tallo y dos fuera de la copa a 300 cm de distancia del tallo, sumando un total de 12 puntos de muestreo (Fig. 3).

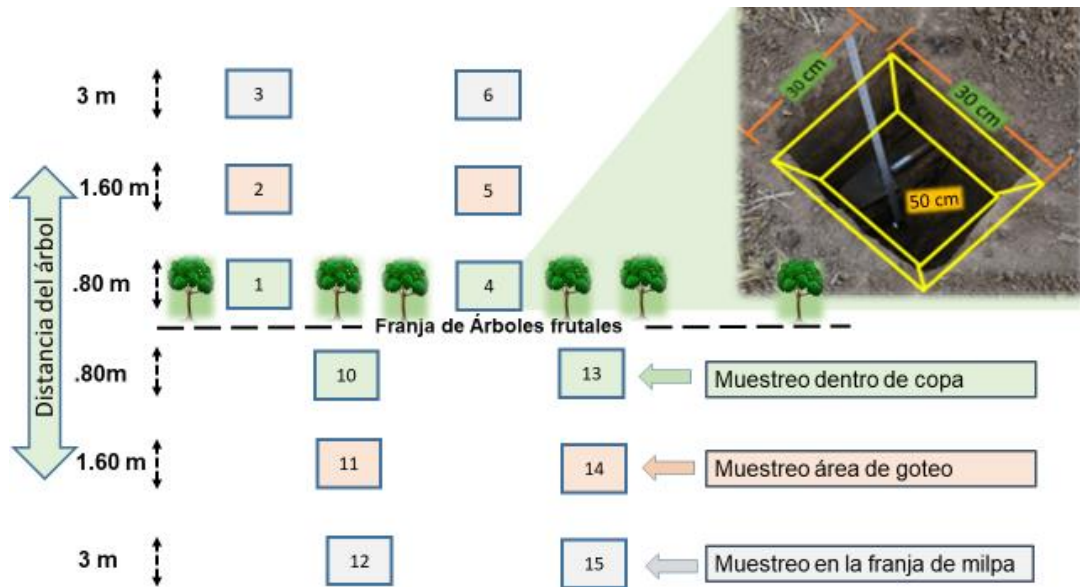


Figura 3. Diseño de muestreo de una sub-parcela MIAF
(Fuente: elaboración propia)

Para la dispersión de los puntos de muestreo del pastizal, se tomaron muestras dentro de la parcela de 1000 m² aplicando un muestreo sistemático en zigzag, en el cual las distancias entre cepas (puntos de muestreo) fueran uniformes para cubrir la totalidad del área a muestrear como se muestra en la (Fig.4).

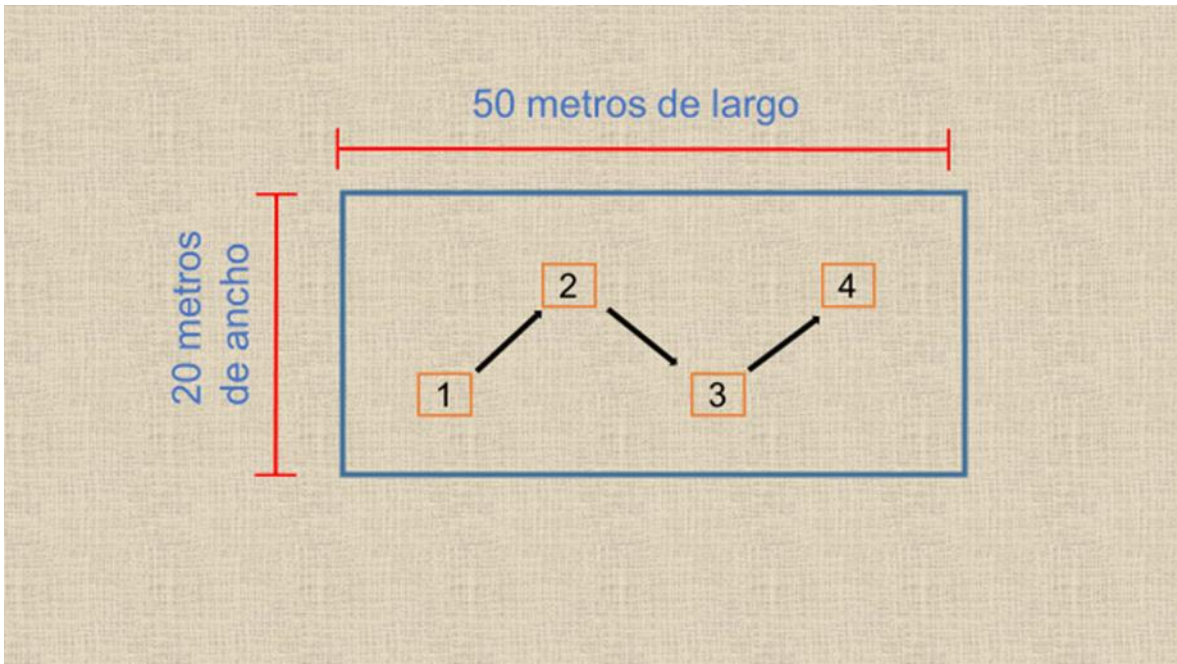


Figura 4. Diseño de muestreo de suelo raíces fina en pastizal
(Fuente: elaboración propia)

Las muestras se depositarán en bolsas de papel Kraft de color café con su respectiva etiqueta envueltas por otra bolsa de plástico y se llevarán al laboratorio de la Facultad de Ciencias Agronómicas campus V, donde se separarán de acuerdo a su finalidad.

3.8.- Obtención de raíces finas

Para la obtención de las raíces finas se usó la técnica modificada del monolito, mediante un muestreador o núcleo cúbico de 9000 cm^3 en cada punto de muestreo, como se muestra en la (Fig.5).



Figura 5. Nucleador cubico de 9000 cm^3
(Fuente: elaboración propia)

Las muestras de raíces con suelo fueron lavadas con abundante agua para separar la arcilla de las raíces por el tipo de suelo Vertisol Pélico. Finalmente, las muestras

colectadas fueron llevadas al laboratorio para ser separadas en raíces finas (≤ 2 mm) leñosas para el cultivo de guayaba y fibrosas para maíz, frijol y malezas. Para identificar y separar las raíces, se tomó en cuenta los criterios de estructura, rigidez y color, con la ayuda de un vernier y pinzas. Posteriormente, fueron secadas en estufa a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, a 72 horas tomando los valores de peso seco. La variable evaluada del primer objetivo específico es la biomasa radicular (≤ 2 mm) de los dos sistemas como se muestra en el (Cuadro1), que ayudaron a correlacionar la producción de raíces finas.

Cuadro 1. Variables evaluadas en la distribución de raíces finas

Variables independientes	Variables dependientes
Inclinación del árbol (favor y contra) hacia la sub-franja de maíz y frijol	<ul style="list-style-type: none"> • Biomasa radicular (≤ 2 mm)
Distancias de la sub-franja central del frutal (80, 160 y 300 cm)	
Profundidad (0-10, 10-20, 20-30, 30-40 y 40-50 cm)	
Sistemas (MIAF y Pastizal)	

3.9.- Segunda fase: Se analizaron las dos muestras adyacentes definidas por inclinación, distancia y profundidad. Para el análisis químico, se tomó una rebanada de suelo homogéneo y para el análisis físico, se muestreo con la ayuda de un cilindro. El análisis de COS se realizó con el método de digestión química seguido por espectrofotometría (Walkley y Black, 1934) propuesto por la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2015). Para la determinación de pH y potencial redox (Eh) de suelo, se utilizó un potenciómetro. Para densidad aparente (DA) se obtuvieron las muestras de suelo con el método del cilindro de volumen conocido, tal como se encuentra en el campo (sin disturbios).

3.9.1.- Determinación de densidad aparente

Las muestras de suelo se pesarán en fresco para descartar la variabilidad de peso por la gran cantidad de humedad que se obtienen en los suelos arcillosos. se secaron las muestras a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ sin perturbaciones en una estufa durante tres días para obtener el peso seco. La densidad aparente varía mucho dependiendo de la condición estructural del suelo, por lo general se encuentra expresada en g/cm^3 (Blake y hartge,1986. y Salazar-Calvo, 2020).

La determinación de la densidad aparente del suelo está basada en dos mediciones: (1) la masa de suelo seco (M_s) de una muestra y (2) el volumen total (V_t) que ocupa la muestra. La masa de suelo seco es medida después de secar la muestra a $110 \pm 5^\circ\text{C}$, hasta alcanzar peso constante, el método de cilindro de volumen conocido. Mediante este método se tomó una muestra cilíndrica de suelo, introduciendo un cilindro de acero inoxidable a intervalo, con profundidad de 10 cm hasta 50 cm con el propósito de obtener una muestra de suelo de volumen conocido (V_t), tal como se encuentra en el campo (sin disturbios). Esas muestras fueron secadas para obtener la masa de suelo seco (M_s). El cilindro que usamos fue de un diámetro de 5.08 cm y una altura de 10 cm con un volumen de 202.68 cm^3 . En la masa de suelo seco, no se consideró el peso de las piedras, fragmentos de plantas y animales que no pasan en el tamiz de 2 mm.

3.9.2.- Análisis químico para la evaluación de carbono orgánico

Las muestras de suelo para análisis químico se secaron a temperatura ambiente, fueron molidas y tamizadas de acuerdo a la norma oficial mexicana. Para la determinación de carbono orgánico, se utilizó el método de digestión química (Walkley y Black, 1934) seguido por la lectura en espectrofotómetro. Se trituran las muestras de suelo con el apoyo de mazos, se tamizaron las muestras con el fin de generar una mezcla homogénea y fina libre de impurezas. Se pesaron 0.250 gr de cada muestra seca, la cual se colocaron en matraces de 250 ml para el análisis químico incorporando 5 ml de dicromato de potasio agitando suavemente para homogenizar la reacción. Posteriormente, se agregaron 10 ml de ácido sulfúrico y se dejaron reposar por 30 minutos, después se le agregaron 100 ml de agua destilada.

Al estabilizarse, se tomó una muestra y se observó los valores de absorbancia de cada muestra generada en el espectrofotómetro con una longitud de onda de 600nm. Por último, se ajustó el valor de absorbancia de acuerdo a la curva de calibración previamente desarrollada con sacarosa para la conversión de miligramos de carbono. En este caso la curva de calibración fue $Y = 0 + 55.59 X$, donde y = miligramos de C, 55.59 = constante de sacarosa, X = absorbancia. Las

variables a evaluar del segundo objetivo son acumulación de CO y propiedades físico químicas del suelo como DA, pH y Eh como se muestran en el (Cuadro 2).

Cuadro 2. Variables evaluadas en la captura de CO y propiedades fisicoquímicas del suelo

Variables independientes	Variables dependientes
Inclinación del árbol (favor y contra) hacia la sub-franja de maíz y frijol	<ul style="list-style-type: none"> • Acumulación de CO, DA, pH y Eh.
Distancias de la sub-franja central del frutal (80, 160 y 300 cm)	
Profundidad (0-10, 10-20, 20-30, 30-40 y 40-50 cm)	
Sistemas (MIAF y Pastizal)	

3.10.- Análisis de datos

Los datos de carbono y raíces finas se procesaron con tablas dinámicas para realizar una prueba cruzada y descartar posibles errores en la colocación y captura de datos. En el caso de que los datos reflejan un comportamiento atípico, se repitieron los análisis correspondientes con el paquete estadístico de Minitab.

Los datos normales se analizarán con ANOVA factorial para evidenciar las diferencias estadísticas entre sistemas y la distribución espacial, con la finalidad de evaluar la existencia de alguna interacción significativa entre estas variables. También se utilizaron los análisis de correlación y regresión lineal para evaluar la asociación entre el almacenamiento de carbono en suelo, biomasa de raíces finas, y otras variables de propiedades de suelo.

Para el modelo de supuesto estadístico se verifico el supuesto de normalidad de los datos, el supuesto de homogeneidad de varianzas y se asumió la distribución homogeneidad del error como hipótesis de base para el análisis de varianza antes de realizar las agrupaciones con Tukey ≤ 0.05 .

4.- RESULTADOS

4.1.- Distribución de biomasa radicular

El análisis de varianza de la biomasa total de raíces finas indicó diferencia altamente significativa ($p > 0.01$) entre el sistema MIAF y el pastizal (Tabla 1).

Tabla 1. Efecto de los sistemas en la producción total de biomasa radicular ≤ 2 mm

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Sistema	1	4159440	4159440	32.31	0.000
Error	138	17766463	128742		
Total	139	21925903			

Análisis de varianza del efecto del sistema milpa intercalada con árboles frutales y pastizal

El MIAF obtuvo una media de 220.8 g m^{-3} con intervalo de confianza de 95 % de $156.1 - 285.6 \text{ g m}^{-3}$, mientras que el pastizal obtuvo una media de 713.0 g m^{-3} con intervalo de $555.0 - 872.0 \text{ g m}^{-3}$ (Fig. 6). La cantidad de raíces finas en el pastizal es 3.2 veces mayor que el MIAF debido a la alta producción de biomasa radicular en los primeros 10 cm de profundidad.

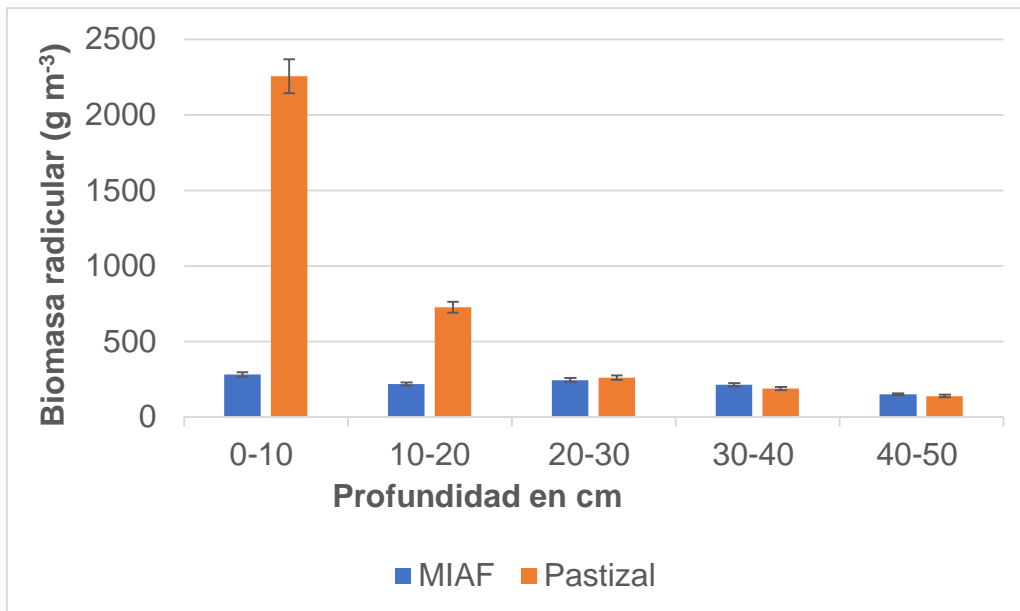


Figura 6. Biomasa (g m^{-3}) de raíces finas (≤ 2 mm) en el sistema MIAF y el pastizal a diferentes profundidades. Las barras de error indican los 95% de intervalos de confianza.

Por otro lado, el análisis de varianza de la biomasa de raíces finas, en el sistema MIAF indicó diferencia altamente significativa ($p>0.01$) en inclinación, distancia y profundidad (Tabla 2), como también la interacción distancia*profundidad.

Tabla 2. Efecto del MIAF en la distribución de biomasa radicular ≤ 2 mm. Análisis de varianza del efecto de la inclinación, distancia, profundidad e interacciones en el sistema milpa intercalada con árboles frutales.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	29	1113820	38408	1.87	0.013
Lineal	7	495730	70819	3.46	0.003
Inclinación	1	121516	121516	5.93	0.017
Distancia	2	148517	74259	3.62	0.031
Profundidad	4	225697	56424	2.75	0.033
Interacción de 2 términos	14	578794	41342	2.02	0.025
Inclinación*Distancia	2	120328	60164	2.94	0.058
Inclinación*Profundidad	4	65301	16325	0.80	0.530
Distancia*Profundidad	8	393165	49146	2.40	0.022
Interacción de 3 términos	8	39296	4912	0.24	0.982
Inclinación*Distancia*Profundidad	8	39296	4912	0.24	0.982
Error	90	1844199	20491		
Total	119	2958019			

El análisis de varianza de la biomasa de raíces finas totales, indicó diferencia altamente significativa ($p>0.01$) en contra de la inclinación del árbol, con media de 252.6 g m^{-3} , mientras que a favor la biomasa obtuvo una media de 189.0 g m^{-3} . En distancia fue mejor a 160 cm con media de 261.1 g m^{-3} , en comparación de 80 cm con media de 225.9 g m^{-3} y 300 cm con media de 175.4 g m^{-3} . En profundidad se encuentra diferencia estadística de 0–10 cm con media de 280.9 g m^{-3} en comparación de 40–50 cm con media de 149.1 g m^{-3} (Tabla 3).

Tabla 3. Biomasa de raíces finas con un diseño factorial de múltiples niveles, en g m⁻³, área ocupada por el sistema MIAF.

Factor	Parámetro	Media g m ⁻³	Agrupación Tukey	Valor F, p
Inclinación del árbol	Favor	189.0 (149.4, 228.6)	B	5.06, 0.026
	Contra	252.6 (213.0, 292.3)	A	
Distancia del árbol	80 cm	225.9 (177.4, 274.4)	AB	3.09, 0.049
	160 cm	261.1 (212.6, 309.7)	A	
	300 cm	175.4 (126.9, 223.9)	B	
Profundidad	0-10 cm	280.9 (218.6, 343.2)	A	2.37, 0.056
	10-20 cm	216.5 (154.1, 278.8)	AB	
	20-30 cm	244.5 (182.2, 306.8)	AB	
	30-40 cm	213.3 (151.0, 275.6)	AB	
	40-50 cm	149.1 (86.7, 211.3)	B	

Medias con diferente letra en agrupación indican diferencia significativa (Tukey \leq 0.05).

Esto indica que el sistema MIAF tiene buena distribución de biomasa radicular, en inclinación del árbol a pesar de que tiene diferencia estadística no perjudica ya que los árboles están con diferente inclinación a cada metro por el manejo del sistema. En distancia del árbol, solo se encontró diferencia estadística de 160 a 300 cm, pero después de los 300 cm puede ser compensada con las raíces finas de los cultivos anuales y en profundidad solo existe diferencia estadística de 0 – 10 cm en comparación de 40 – 50 cm de profundidad. En comparación del pastizal, que tiene perdidas ascendentes con diferencia estadística ($F = 23.25$, $p = 0.000$), siendo mucho mayor 0 - 10 cm de profundidad con media de 2255.0 g m⁻³ (intervalo de confianza 1860 - 2650 g m⁻³) en comparación de 10 - 20 cm con media de 724.4 g m⁻³ (intervalo de confianza 329.8-1119.1 g m⁻³) (Fig. 7).

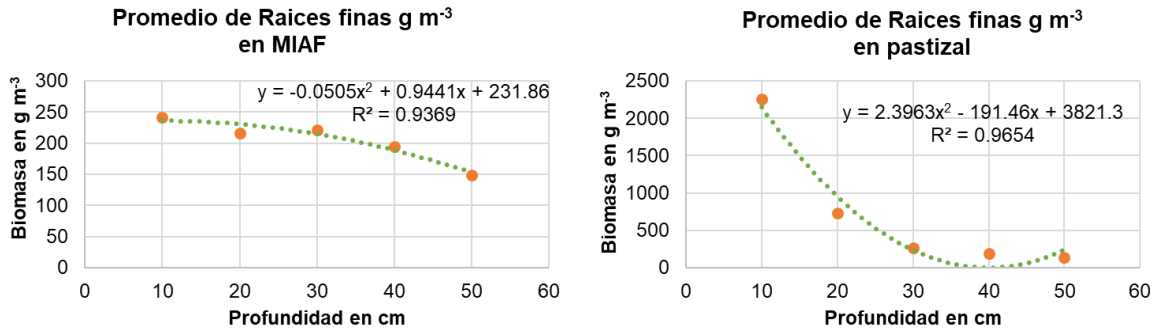


Figura 7. Gráficos de regresión en biomasa radicular a diferentes profundidades del sistema MIAF y pastizal.

Sin embargo, dentro del sistema MIAF, se encontraron diferencias estadísticas entre las raíces leñosas y fibrosas, en las leñosas se presentó una media de 150.2 g m⁻³, en comparación a las fibrosas que presentó una media de 70.7 g m⁻³ (Fig. 8).

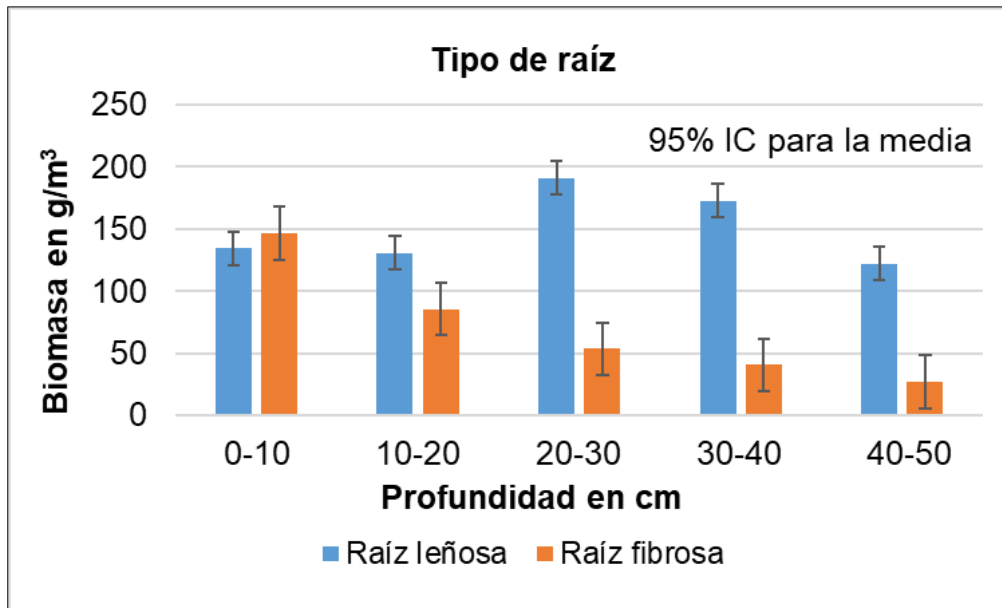


Figura 8. Distribución de raíz leñosa y fibrosa del sistema MIAF a diferentes profundidades.

Las raíces leñosas dentro del MIAF presento diferencia estadística en distancia ($F = 26.62$, $p = 0.000$) siendo mayor a 80 cm del árbol con media de 218.8 g m⁻³ (intervalo de confianza 178.6 - 259.0 g m⁻³) en comparación a los 300 cm de distancia con media de 29.72 g m⁻³ (intervalo de confianza -10.45 - 69.89 g m⁻³). Sin embargo, la raíz fibrosa presento diferencia estadística en distancia ($F = 17.19$, $p =$

0.000) y profundidad ($F = 4.15$, $p = 0.004$), comportamiento opuesto a las leñosas, siendo mejor a 300 cm de distancia con media de 145.7 g m^{-3} (intervalo de confianza $112.3 - 179.1 \text{ g m}^{-3}$). A profundidad, se encuentra los primeros 10 cm más alto con media de 146.6 g m^{-3} (intervalo de confianza $100.3 - 192.9 \text{ g m}^{-3}$) comparado con los de 20 - 50 cm de profundidad (Fig. 9).

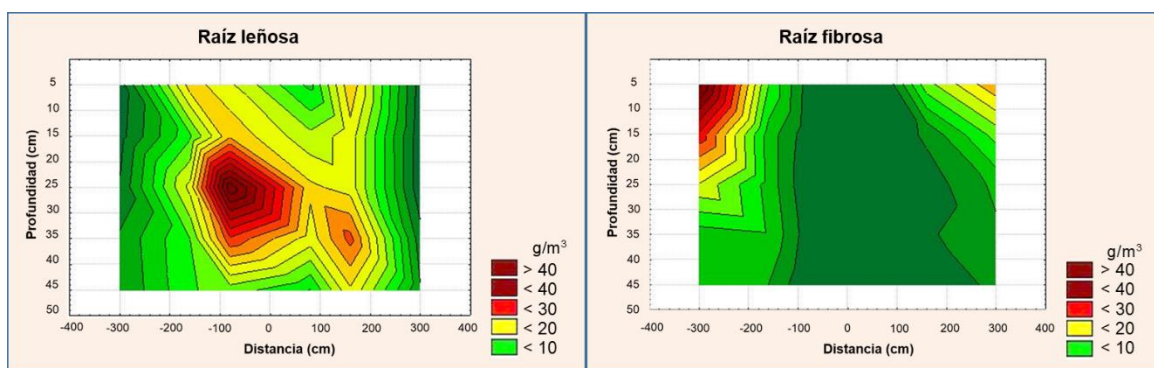


Figura 9. Gráfico 3D de oblea, raíz leñosa y fibrosa ($\leq 2 \text{ mm}$) del sistema MIAF presentado a colores en g m^{-3} excluye al pastizal los números negativos representa la inclinación en contra del árbol.

4.2.- Propiedades del suelo

Los resultados obtenidos con las variables edáficas indican que la DA entre sistemas no presentó diferencia estadística. Sin embargo, dentro del sistema MIAF, en profundidad si presenta diferencia estadística, menor en los primeros 10 cm con media de 1.0 g m^{-3} , en comparación a profundidades de 20 - 50 cm con media de 1.1 g cm^{-3} (Tabla 4).

Tabla 4. Densidad aparente expresada en g m^{-3} en diferente inclinación, distancia y profundidad del árbol.

Factor	Parámetro	Media g m^{-3}	Agrupación Tukey	Valor F, p
Inclinación del árbol	Favor	1.1 (1.1, 1.2)	A	0.38, 0.536
	Contra	1.1 (1.1, 1.2)	A	
Distancia del árbol	80 cm	1.1 (1.1, 1.2)	A	1.13, 0.325
	160 cm	1.1 (1.1, 1.2)	A	

	300 cm	1.1 (1.1, 1.1)	A	
	0-10 cm	1.0 (1.0, 1.1)	B	
	10-20 cm	1.1 (1.1, 1.2)	A	
Profundidad	20-30 cm	1.2 (1.1, 1.2)	A	2.37, 0.056
	30-40 cm	1.2 (1.1, 1.2)	A	
	40-50 cm	1.1 (1.1, 1.2)	A	

Medias con diferente letra en agrupación indican diferencia significativa (Tukey \leq 0.05).

El pH fue estadísticamente mayor en el sistema MIAF ($F = 9.38$, $p = 0.003$) al compararse con el valor obtenido en el pastizal (Fig. 10). En el MIAF, el pH se presentó con una media de 7.8 (intervalo de confianza 7.8 - 7.9) en comparación al pastizal con media de 7.5 (intervalo de confianza 7.3 - 7.7). Esto indica que lo observado en el pastizal, el pH se acerca más a la neutralidad mejorando la disponibilidad, reciclaje de nutrientes y crecimiento de microorganismos.

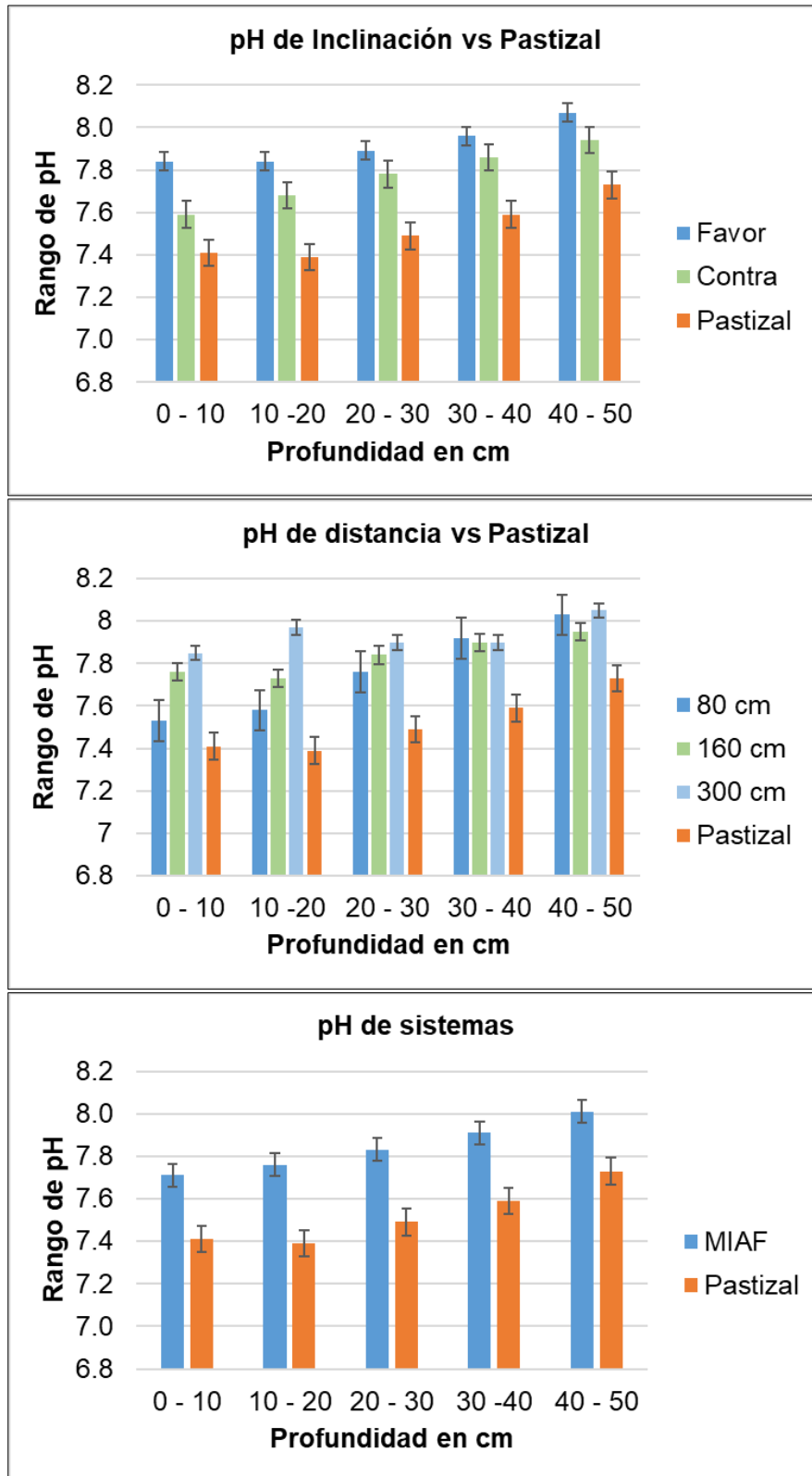


Figura 10. Gráficos de barras, pH a diferentes inclinaciones, distancias y profundidades incluyendo al pastizal.

Para potencial redox (Eh) del suelo, se presentó diferencia estadística entre sistemas ($F = 9.42$, $p = 0.003$) siendo mejor el pastizal con una media de -19.8 (intervalo de confianza -29.8 , -9.7) en comparación al MIAF con media de -36.6 (intervalo de confianza -40.7 , -32.5) acercándose a la estabilización, pero sin diferencia estadística a profundidad comportándose muy similar a lo observado en pH. Sin embargo, el MIAF tuvo diferencia estadística ($F = 3.58$, $p = 0.009$) a diferentes profundidades, siendo mejor en los primeros 10 cm con media de -26.1 (intervalo de confianza -35.2 , -17.0) en comparación de 40 - 50 cm con media de -47.1 (intervalo de confianza -56.2 , -38.1) (Fig. 11).

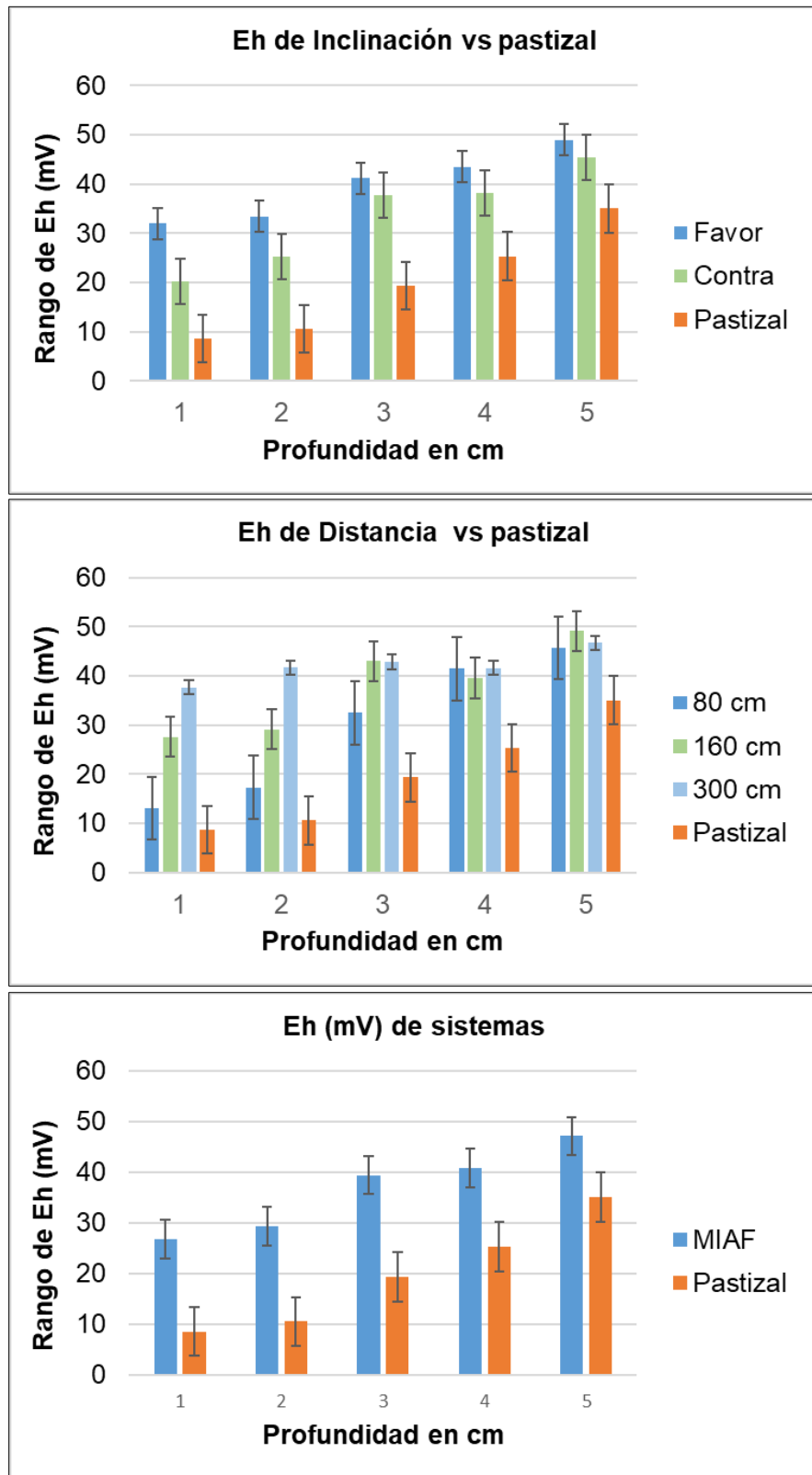


Figura 11. Gráficos de barras de Eh (mV) a diferentes inclinaciones, distancias y profundidades incluyendo al pastizal.

4.3.- Distribución de carbono orgánico en el suelo

El análisis de varianza de COS no presentó diferencia estadística entre sistemas, sin embargo, en sistemas separados el MIAF muestra diferencia altamente significativa ($p > 0.01$) en distancia y profundidad (Tabla 5).

Tabla 5. Efecto del MIAF en la distribución de COS. Análisis de varianza del efecto de la inclinación, distancia, profundidad e interacciones en el sistema milpa intercalada con árboles frutales.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	29	27.5525	0.95008	2.82	0.000
Lineal	7	23.4510	3.35015	9.96	0.000
Inclinación	1	0.0786	0.07858	0.23	0.630
Distancia	2	15.1650	7.58252	22.54	0.000
Profundidad	4	8.2074	2.05185	6.10	0.000
Interacción de 2 términos	14	2.3336	0.16669	0.50	0.930
Inclinación*Distancia	2	0.2014	0.10068	0.30	0.742
Inclinación*Profundidad	4	0.4961	0.12402	0.37	0.830
Distancia*Profundidad	8	1.6362	0.20453	0.61	0.769
Interacción de 3 términos	8	1.7678	0.22097	0.66	0.728
Inclinación*Distancia*Profundidad	8	1.7678	0.22097	0.66	0.728
Error	90	30.2700	0.33633		
Total	119	57.8224			

En distancia horizontal, se encuentra diferencia estadística mayor a 80 cm del árbol con media de 2.3 % de COS en comparación de 160 y 300 cm. En profundidad, se encuentra con diferencia estadística mayor en los primeros 10 cm de profundidad con media de 2.2 % de COS comparado a profundidades de 30 - 50 cm con media de 1.6 % de CO (Tabla 6).

Tabla 6. Carbono orgánico en % de 250 miligramos de suelo del sistema MIAF.

Factor	Parámetro	Media %	Agrupación Tukey	Valor F, p
Inclinación del árbol	Favor	1.8 (1.6, 2.0)	A	0.16, 0.689
	Contra	1.8 (1.6, 1.9)	A	

Distancia del árbol	80 cm	2.3 (2.1, 2.5)	A	20.80, 0.000
	160 cm	1.7 (1.5, 1.9)	B	
	300 cm	1.4 (1.2, 1.6)	B	
Profundidad	0-10 cm	2.2 (1.9, 2.5)	A	4.76, 0.001
	10-20 cm	1.9 (1.7, 2.2)	A	
	20-30 cm	1.7 (1.5, 2.0)	AB	
	30-40 cm	1.6 (1.4, 1.9)	B	
	40-50 cm	1.5 (1.2, 1.7)	B	

Medias con diferente letra en agrupación indican diferencia significativa (Tukey ≤ 0.05).

Por otro lado, el pastizal cuenta con diferencias estadísticas mayor de COS ($F = 5.99$, $p = 0.004$) en los primeros 10 cm de profundidad con media de 2.8 (intervalo de confianza 1.9 - 2.5) % de COS en comparación de 30 - 50 cm con media de 1.3 (intervalo de confianza 1.4 - 1.9) % de COS (Fig. 12). Esto indica una disminución acentuada de COS a mayor profundidad en el pastizal en comparación del MIAF que mejora la retención de COS en el sistema.

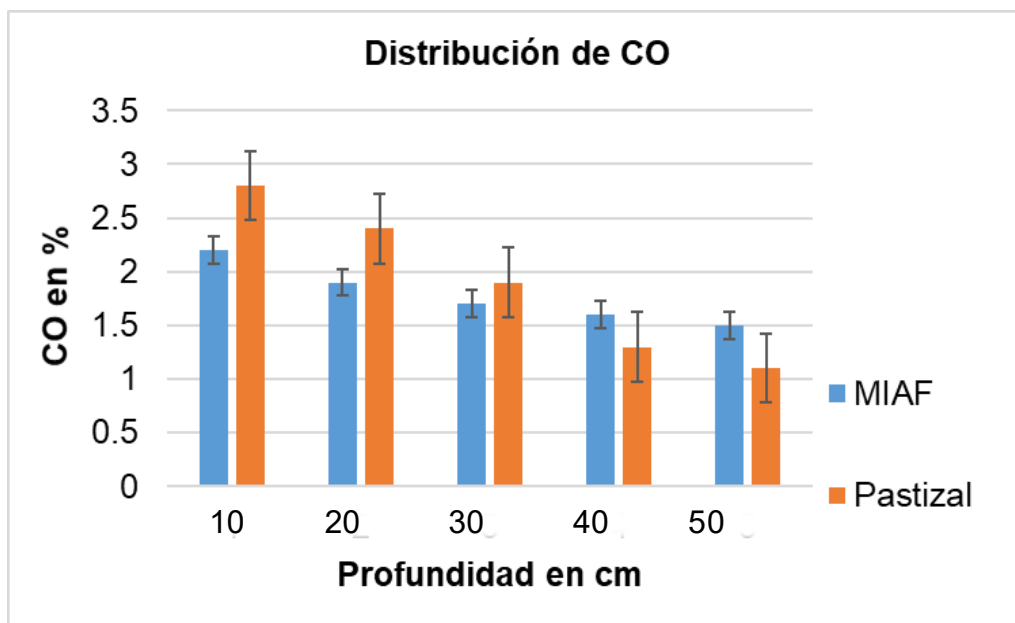


Figura 12. Gráfico de columna distribución de CO en % de 250 miligramos de suelo para los dos sistemas a diferentes profundidades.

5.- DISCUSIÓN

5.1.- Relación de biomasa radicular y parámetros del suelo

La cantidad de biomasa de raíces finas cambia en función de las características fisicoquímicas de los sistemas como son: especies, edad, manejo agronómico propiedades del suelo y factores ambientales (Gómez *et al.*, 2021; Rico y Suárez, 2018 y Contreras-Santos *et al.*, 2021). En el sistema MIAF sigue un patrón muy similar a los sistemas agroforestales con producción de raíces leñosas y fibrosas con una distribución vertical y horizontal dependiendo del número y tipo de especies establecidas, las raíces leñosas se concentran de 20 - 40 cm de profundidad y a 80 cm de distancia horizontal con mayor estabilidad, mientras que las raíces fibrosas se concentran en los primeros 10 cm de profundidad y a distancia horizontal de 300 cm del árbol. Resultados similares fueron reportados por Rendón y Giraldo-Herrera (2019) quien menciona que la mayor productividad estuvo a 25 cm de profundidad y 50 cm de distancia con un promedio de 425.95 g y 478.77 g.

El pastizal tiene altas concentraciones de biomasa radicular en comparación del MIAF, un comportamiento opuesto a lo reportado por Contreras-Santos *et al.* (2021) y De, (2022), quien reporta una baja productividad de biomasa radicular en gramíneas, esto podría deberse a que el pastizal no tiene un manejo silvopastoril, sin embargo, son muy similares en su poca estabilidad en producción de raíces finas a diferentes profundidades y abundante producción de biomasa en los primeros 10 cm de profundidad.

La distribución vertical y horizontal de las raíces leñosas y fibrosas mantiene un pH homogéneo a diferentes profundidades y distancias del árbol en el sistema MIAF, sin embargo, el pastizal muestra un comportamiento diferente disminuyendo la biomasa radicular drásticamente a mayor profundidad con diferencia significativa en los primeros 10 cm de profundidad con un pH heterogéneo a diferentes profundidades, pero de mejor rango con una media de 7.5 gracias a su constante producción radicular y acumulación de materia orgánica, lo cual podría ser provocado por el manejo agronómico del sistema MIAF. Sin embargo, el decremento de raíces a profundidad es de forma inversa a la DA en los dos sistemas, la compactación se le atribuye al tipo de suelo por ser Vertisol pélico, ya

que cuenta hasta con un 70 % de arcilla y macroagregados que aplican resistencia al rompimiento del suelo por las raíces (García-Oliva y Paz-Tapia, 2001; Rendón y Giraldo-Herrera, 2019; Pérez *et al.*, 2013).

5.2.- Carbono orgánico y propiedades del suelo

Diferentes estudios han demostrado que los desarrollos radiculares de las especies leñosas aportan hasta 50 % de la biomasa total en los arreglos agroforestales (Cotler *et al.*, 2016). El sistema MIAF aporta hasta 67.9 % de la biomasa radicular total. Siendo un importante reservorio de COS debido a su rápida reconversión en diferentes profundidades, sumando la asociación de gramíneas y leguminosas por la milpa tradicional (Arriaga-Vásquez *et al.*, 2020).

El almacenamiento de COS en los dos sistemas disminuye conforme se profundiza evidenciando mayor acumulación de COS en los primeros 10 cm de profundidad. Resultados muy similares a los reportados por Contreras-Santos *et al.* (2021). Sin embargo, en el MIAF la mayor acumulación de COS con diferencia se observa de 0 -20 cm de profundidad en comparación de 30 - 50 cm de profundidad y a 80 cm de distancia horizontal en comparación de 160 - 300 cm del árbol, teniendo comportamientos similares a la distribución de raíces leñosas. El pastizal acumula 54.8 % de COS en los primeros 20 cm de profundidad y el MIAF 46 % comportándose establecen mejor distribución a diferentes horizontes del suelo en todo el sistema. Esto se puede relacionar al buen desarrollo radicular contribuyendo a la homogeneidad del pH, DA y Eh en todo el sistema MIAF.

6.- CONCLUSIONES

Las raíces finas del sistema MIAF se encuentran distribuidas a diferentes profundidades y distancias del árbol, pero las mayores concentraciones de las raíces leñosas producida por los árboles se concentran en el área de goteo. La distribución de raíces finas en suelos superficiales es mayor en pastizal nativo pero el sistema MIAF tiene mayor biomasa de raíces finas en horizontes más profundos. Al aumentar la producción de raíces finas a diferentes horizontes, mejora las condiciones del suelo al reducir la DA, y al favorecer en la captura de COS a profundidades mayores donde los suelos de pastizales no logran producir raíces finas para facilitar la fijación de COS.

La cuantificación del COS del sistema MIAF se puede clasificar como un almacenamiento medio sin diferencia estadística con el pastizal. Sin embargo, el MIAF tiene mayor acumulación de COS en horizontes más profundos del suelo, pero su mayor presencia es en el área de goteo. El pastizal acumula más de la mitad de COS en los primeros 30 centímetros de profundidad. Sin embargo, el MIAF acumula menos de la mitad en los primeros centímetros mejorando la acumulación a horizontes más profundos, el cual contribuye a la homogeneidad del pH, reducción de la DA y Eh.

Esto indica que los pastizales tienen alta acumulación de COS, pero solo en los primeros centímetros de profundidad ocasionando poco reciclaje de nutrientes en horizontes más profundos en comparación al MIAF, donde los cultivos asociados interactúan con componentes arbóreos mejorando el almacenamiento de carbono, estructura de los suelos y la eficiencia del uso del agua y nutrientes en diferentes profundidades que garantiza mayor resiliencia ante fluctuaciones climáticas y recuperación productiva más rápida en presencia de periodos largos de estiaje. Para futuras investigaciones se recomienda realizar estudios con diferentes especies de frutales, para conocer su aportación en la fijación de carbono en el suelo y su desarrollo radicular en el sistema, por su diferente comportamiento y respuesta productiva de biomasa radicular. Como también realizar un estudio en diferentes ciclos del año, que no se pudieron realizar en este estudio y que nos ayudaría a comprender la fluctuación de la biomasa radicular durante el año.

7.- REFERENCIAS

- Alayon-Gamboa, J. A. ., Jiménez Ferrer, G., Nahed Toral, J., y Villanueva López, G. (2016). Forest Grazing Strategies Used To Mitigate the Effects of Climate. *Agroproductividad*, 9, 10–15.
- Albino-Garduño, R., Turrent-Fernández, A., Isabel Cortés-Flores, J., Livera-Muñoz, M., & Carmen Mendoza-Castillo, M. (2015). Distribución de raíces y de radiación solar en el dosel de maíz y frijol intercalados. *Agrociencia*, 49(5), 513–531.
- Arriaga-Vázquez, A. M., Martínez Menez, M. R., Rubiños-Panta, J. E., Fernández-Reynoso, D. S., Delgadillo-Martínez, J., y Vázquez-Alarcón, A. (2020). Propiedades químicas y biológicas de los suelos en milpa intercalada con árboles frutales. *Revista Terra Latinoamericana*, 38(3), 465–474. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.599>
- Aryal, D. R., Castro, H. G., García, C., José, O. D. J., Fernando, L., Paniagua, M., Antonio, J., Trujillo, J., y Venegas, J. A. (2018). forestales en un sistema ganadero Carbon storage potential in forest areas within a livestock system Introducción El sector ganadero está creciendo muy rápido en los trópicos con consecuencias. 9(48).
- Bello-Baltazar, E. E. D. (2012). La Otra Innovacion Para El Ambiente Y La Sociedad; En La Frontera Sur De México/Ed. Eduardo Bello Baltazar. La Otra Innovación Para El Ambiente y La Sociedad En La Frontera Sur de México, 70–79.
- Benedetti-Ruiz, S., y Espinoza R., N. (2018). Sistemas agroforestales. *Ciencia y Investigación Forestal*, 6(2), 281–293. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.1992.174>
- Blake, G.R; K.H. Hartge, (1986), Bulk Density. In: A. Klute, ed., *Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods: Agronomy Monograph no. 9* (2nd ed.) ASA and SSSA, Madison, WI. pp. 363-375.
- Cadena-Iñiguez, P., Camas Gómez, R., Walter López Báez, §, Del Carmen López Gómez, H., y Helder González Cifuentes, J. (2018). El MIAF, una alternativa viable para laderas en áreas marginadas del sureste de México: caso de estudio en Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(7), 1351–1361. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1670>
- Camas-Gómez, G.R. (2012). Erosión hídrica, productividad, captura de carbono y uso de la radiación solar y agua en tres sistemas de manejo, para la agricultura de ladera en el trópico subhúmedo de México. Colegio de Posgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. De México 189-190 pp.
- Camas-Gómez, R., Turrent Fernández, A., Cortes Flores, J. I., Livera Muñoz, M., González Estrada, A., Villar Sánchez, B., López Martínez, J., Espinoza Paz, N., y Cadena Iñiguez, P. (2018). Erosión del suelo, escurrimiento y pérdida de nitrógeno y fósforo en laderas bajo diferentes sistemas de manejo en Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(2), 231–243. <https://doi.org/10.29312/remexca.v3i2.1459>
- CEIEG. 2012. Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica. Regiones socioeconómicas. Compendio de información estadística y geográfica de Chiapas [fecha de Consulta: 17 de junio de 2021]. Disponible en: http://www.ceieg.chiapas.gob.mx/home/wp-content/uploads/downloads/productosdgei/CIGECH/CIGECH_REGIONES.pdf
- Clemente-Arenas, E. R. (2021). Captura de carbono en sistemas agroforestales en el Perú. *Revista Forestal del Perú*, 36(2), 180-196. DOI: <https://doi.org/10.21704/rfp.v36i2.1797>
- Contreras-Santos, J. L., Martínez Atencia, J., y Falla Guzman, C. K. (2021). Carbono acumulado en raíces de especies vegetales en sistemas silvopastoriles en el Norte de Colombia. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(1), 52–69. <https://doi.org/10.15359/rca.55-1.3>

- Cotler, H., Martínez, M., y Etchevers, J. D. (2016). CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS AGRÍCOLAS DE MÉXICO: INVESTIGACIÓN Y POLÍTICAS PÚBLICAS Organic Carbon in Agricultural Soils of Mexico: Research and Public Policy. *Investigación Políticas Públicas*, 34(1), 125–138.
- De, M. S. A. (2022). Análisis espacial y temporal del efecto de las plantaciones de *Eucalyptus grandis* en el carbono del suelo y de la biomasa en Entre Ríos y SE de del Cisne Jiménez-Torres, A. (2021). La diversidad mejora el almacenamiento de carbono en los bosques tropicales. *RECIMUNDO*, 5(3), 316-323.
- Editorial Grudemi (2019). Muestreo probabilístico. Recuperado de Enciclopedia Económica (<https://enciclopediaeconomica.com/muestreo-probabilistico/>).
- FAO (The Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2010). Mitigación (en línea). Disponible en <http://www.fao.org/climatechange/49370/es/> (citado el 26 de mayo 2011).
- Forero, S. P., Santos, L. N. S., Castañeda, H. J. A., y Madrigal, M. A. S. (2018). Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. *Revista de investigación agraria y ambiental*, 9(2), 121-134.
- Frickel, S., y Moore, K. (2006). The new political sociology of science: Institutions, networks, and power. In *The New Political Sociology of Science: Institutions, Networks, and Power*. <https://doi.org/10.1177/009430610803700551>
- Friedlingstein, P., O’Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S., Aragão, L. E. O. C., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N. R., ... Zaehle, S. (2020). Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4), 3269–3340.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México.
- García-Oliva, F., y Paz-Tapia, M. (2001). Dinámica estacional de la biomasa de las raíces finas asociada a agregados del suelo en un ecosistema tropical estacional. *Botanical Sciences*, 21(69), 15–21. <https://doi.org/10.17129/botsci.1643>
- Geymonat, A. (2018). *Pastizales En El Mundo : Un Análisis Con Énfasis En Los Pastizales Templados*.
- Gómez, J. D., Etchevers, J. D., Monterroso, A. I., Campo, J., Paustian, K., y Asensio, C. (2021). Soil organic carbon and root biomass of *Quercus* sp. *Madera y Bosques*, 27(4). <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742445>
- Hernández-Escobar M. R. (2022). EL ARREGLO TOPOLÓGICO, LA LABRANZA Y EL ACOLCHADO PARA INTENSIFICAR EL SISTEMA MIAF Maíz-Frijol-Arboles DE GUAYABA EN UN VERTIZOL. *Colegio de Postgraduados*, 88.
- Hernández López, F. J. (2014). Línea Base De Carbono En Suelos Con El Sistema Milpa Intercalada Con Árboles Frutales (Miaf) Y Biomasa Aérea. *Colegio de Postgraduados*, 138. <http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/2418>
- Hernández-Lopez. F. J. (2015). *Colegio de postgraduados. Modelos Bayesianos Para La Distribución de Especies Con Registros de Solo Presencias*, 195. http://www.biblio.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/256/Sanchez_Borja_M_DC_Fitosanidad_2010.pdf?sequence=1
- Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero | Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático | Gobierno | gob.mx. (n.d.). Retrieved March 12, (2022), from <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>
- IPCC. Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2022). *Cambio Climático*

- 2022.
- IPCC. (2009). Historical Overview of Climate Change Science: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC, Geneva, Switzerland. <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>
- Kogan, M. (1988). Integrated pest management theory and practice. *Entomologia experimentalis et applicata*, 49(1-2), 59-70
- León, J. B., Unda, S. B., y Batista, R. M. G. (2020). Evaluación de los índices de calidad del suelo de diversos cultivos en diferentes condiciones topográficas. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 3(1), 182-190.
- Ludeiro, P. (2023). Relación entre la estructura y el funcionamiento de pastizales templados. December 2022.
- Martínez, C. (2018). Paisaje Agrícola De La Microcuenca Buenavista ,. 3–31. <http://ring.uaq.mx/bitstream/123456789/1142/1/CN-0027-Carlos Martínez Zepeda.pdf>
- Morales-Ruiz, D. E. (2020). Cambio en el almacén de carbono en sistemas silvopastoriles comparado con monocultivo de pastos. 151–156.
- Pérez, C., Frangi, J., Goya, J., Luy, A., y Arturi, M. (2013). Contenido de nutrientes en las raíces finas y el mantillo de rodales de *Eucalyptus grandis* de diferente edad en la Mesopotamia Argentina Fine roots and litter nutrient content of *Eucalyptus grandis* stands presenting different ages in Mesopotamia Argentina. 34(3), 303–310. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002013000300006>
- Quero-Carrillo, A. R., Enríquez Quiroz, J. F., y Miranda Jiménez, L. (2007). Evaluación de especies forrajeras en América tropical, avances o status quo. *Interciencia*, 32(8), 566-571.
- Regalado, L.J.; Castellanos, A.; Pérez, R.N.; Méndez, E.J.A. y Hernández, R.E. (2020). Estudios Sociales. *Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional* Volumen 30, Número 56. *Revista Electrónica*. ISSN: 2395-9169. 33p
- Rendón, J. R., y Giraldo-Herrera, A. (2019). Distribución de raíces en café variedad castillo® bajo dos arreglos espaciales. *Revista Cenicafé*, 70(1), 7–17. <https://doi.org/10.38141/10778/70101>
- Rico A., A., y Suárez S., J. C. (2018). Biomasa de raíces finas en arreglos agroforestales con cacao en la amazonia occidental colombiana. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 26. <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.80>
- Roncal-García, S., Soto, L., Castellanos, J., Ramírez, N., y Jong, B. (2008). Sistemas agroforestales y almacenamiento de carbono en comunidades indígenas de Chiapas , México. *Interciencia*, 33(3), 200–206.
- Salazar-Calvo, C., González Venegas, J. P., Corrales Valverde, D., Lacayo Vega, J., Carrillo Montoya, K., y Montero González, H. (2020). Comparación de dos métodos para la determinación de la densidad aparente del suelo. *Alcances Tecnológicos*, 13(1), 5 - 12. <https://doi.org/10.35486/at.v13i1.164>
- Sarandón, S. J. (2002). Capítulo 4 El agroecosistema : un sistema natural modificado. Ediciones Científicas Americanas, La Plata, Argentina., 13.
- 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.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Programa Nacional de Medio Ambiente (2015), Semarnat, México, 2015.
- Segura-Madrugal, M. A., Andrade, H. J., y Sierra Ramírez, E. (2020). Diversidad florística y captura de carbono en robledales y pasturas con árboles en Santa Isabel, Tolima, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 68(2), 383-393.
- SIAP.(2022). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Pronóstico Agrometeorológico [fecha de Consulta: 17 de abril de 2022].

<https://www.gob.mx/siap/documentos/pronostico-agrometeorologico-292537?idiom=es>

- Soto-Pinto, L., y Jiménez-Ferrer, G. (2018). Contradicciones socioambientales en los procesos de mitigación asociados al ciclo del carbono en sistemas agroforestales. *Madera y bosques*, 24(SPE).
- Southwood, T. R. E. (1978). *Ecological methods with particular reference to the study of insect* DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-5809-8>
- Turrent-Fernández, A., Cortés Flores, J. I., Espinosa Calderón, A., Hernández Romero, E., Camas Gómez, R., Pablo Torres Zambrano, J., y Zambada Martínez, A. (2017). Opción para modernizar sustentablemente la agricultura en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8, 1169–1185.
- Walkley, A., Black, I.A., (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37, 29–38.