



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN ECOSISTEMAS FORESTALES Y SISTEMAS AGROFORESTALES

EDITH QUIÑONES SÁNCHEZ

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

2022



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: **Contenido de carbono orgánico del suelo en ecosistemas forestales y sistemas agroforestales** realizada por la estudiante: **Edith Quiñones Sánchez** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO


DR. MARTÍN A. BOLAÑOS GONZÁLEZ

ASESOR


DR. ADOLFO LÓPEZ PÉREZ

ASESOR


DR. AURELIO BÁEZ PÉREZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, octubre de 2022

CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN ECOSISTEMAS FORESTALES Y SISTEMAS AGROFORESTALES

Edith Quiñones Sánchez, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2022

RESUMEN

Los bosques del mundo son importantes reservorios de carbono (C); pero su capacidad de almacenamiento se está perdiendo debido a procesos de deforestación, degradación de los ecosistemas forestales y cambios de uso del suelo causados por actividades antropogénicas. El presente trabajo aporta información sobre la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) en la Sierra Madre de Chiapas (SMC), principalmente en sistemas de producción de café bajo sombra de vegetación natural y cultivo de maíz. El COS se estimó de 0 a 30 cm de profundidad. La vegetación secundaria arbórea de la selva mediana perennifolia tuvo la mayor reserva de COS ($103.22 \text{ Mg ha}^{-1}$) y el bosque de pino-encino la menor (26.86 Mg ha^{-1}); el cultivo de maíz reportó un contenido de $31.25 \text{ Mg C ha}^{-1}$. En sistemas productivos de café, el rústico obtuvo la mayor reserva ($113.23 \text{ Mg ha}^{-1}$) y el monocultivo bajo sombra la menor ($71.159 \text{ Mg ha}^{-1}$). Se propuso un modelo en función los contenidos de C que explicó el 23.59% de la variabilidad en el contenido de COS en estos sitios. Las variables con mayor influencia fueron el almacén de C de la capa de hojarasca y la altitud. También se comparó la capacidad de almacenamiento de COS de ecosistemas forestales con la de otros usos de suelos en la región forestal de Texcoco, Estado de México. Se clasificó a la vegetación como: fase 1 a los usos de suelo y vegetación primaria o no perturbada, fase 2, modificados con diversa perturbación, y fase 3, producto de actividades antropogénicas como la agricultura, plantaciones forestales y de árboles frutales. Se encontró la mayor reserva de COS en los sitios con menor perturbación antropogénica, los ecosistemas forestales presentaron hasta tres veces más COS en comparación con los usos de suelo de la fase 3; los bosques de coníferas resultaron ser los más grandes reservorios de COS en comparación con los ecosistemas agrícolas.

Palabras clave: Almacén de carbono, Almacenes de carbono, Deforestación, Ecosistemas forestales, Uso del suelo, Perturbación antropogénica.

SOIL ORGANIC CARBON STOCKS IN FOREST ECOSYSTEMS AND AGROFORESTRY SYSTEMS

Edith Quiñones Sánchez, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2022

ABSTRACT

The forests are important carbon stocks in the world, but its storage capacity is being lost due to deforestation, degradation, and land-use change caused by anthropogenic activities in forest ecosystems. The stock corresponding to soil organic carbon (SOC) represents more than 40% of the total stock in forests, being in many cases the most important stock in these ecosystems. The present research provides information on soil organic carbon (SOC) sequestration capacity in Chiapas Sierra Madre (SMC) locations, mainly in coffee production systems under natural vegetation shade and in maize cultivation. SOC was estimated from 0 to 30 cm depth, the medium evergreen forest secondary treed vegetation had the highest SOC stock ($103.228 \text{ Mg ha}^{-1}$) and the pine-oak forest the lowest ($26.868 \text{ Mg ha}^{-1}$); whereas a maize crop presented a C stock of $31.257 \text{ Mg ha}^{-1}$, the rustic system had the highest stock ($113,231 \text{ Mg ha}^{-1}$) and the shaded monoculture had the lowest ($71,159 \text{ Mg ha}^{-1}$). A model was suggested as a function of the C stock, which explained 23.59% of the variability in the SOC stock in the sample sites. C stocks in the mulch layer and the elevation were the most statistically significant variables. We also compared the COS storage capacity of forest ecosystems and with that of other land uses in the State of Mexico forest region III, where vegetation was classified by phase 1, land uses and primary or undisturbed vegetation, phase 2, with secondary vegetation, modified by diverse disturbances and, as phase 3, resulting from human activity, the highest COS stock was found in phase 1 ($67.2 \text{ Mg C ha}^{-1}$), followed by phase 2 ($58.6 \text{ Mg C ha}^{-1}$) and phase 3 ($22.9 \text{ Mg C ha}^{-1}$). The primary oyamel forest had the highest COS stock with $83.6 \text{ Mg C ha}^{-1}$, followed by cedar forest ($70.6 \text{ Mg C ha}^{-1}$) and pine forest ($57.7 \text{ Mg C ha}^{-1}$); the lowest were coniferous shrubland (3.1 Mg C ha^{-1}), cultivated forest ($13.1 \text{ Mg C ha}^{-1}$) and irrigated agriculture ($13.3 \text{ Mg C ha}^{-1}$).

Key words: Agroforestry systems, Estimation, Deforestation, Forestal zones, Land use.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de la maestría.

Al Dr. Martín Alejandro Bolaños González por haberme guiado, no solo en la elaboración de este trabajo de titulación, sino a lo largo de estos años y haberme brindado el apoyo para desarrollarme profesionalmente ya que gracias a sus consejos y correcciones hoy puedo culminar este trabajo.

Al Programa Mexicano del Carbono que facilitó la información de campo y laboratorio para la estimación de los almacenes de carbono, en especial a Adán Villa Herrera por su apoyo en la Investigación y curación de datos.

A la Protectora de Bosques del Estado de México (PROBOSQUE) por el financiamiento y facilidades otorgadas para realizar esta investigación.

Al Colegio de Postgraduados campus Montecillo, en especial a la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento (LGAC) Manejo Integral de Cuencas y Cambio Climático del programa en Hidrociencias, por los recursos académicos brindados.

Al Dr. Axel Eduardo Rico Sánchez por su disposición y toda su ayuda con el documento de investigación.

A María Patricia Ibarra Alonso por su amabilidad y paciencia al ayudarme con todos los trámites de titulación.

DEDICATORIA

A Dios, por ser el inspirador, por guiarme, por ser el apoyo en aquellos momentos de dificultad y de debilidad y; por ser quien me da fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis padres: Joel Tomás Quiñones y Ma Elena Sánchez por ser los principales promotores de mis sueños, por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que me inculcaron.

Con todo mi amor para mi esposo porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hace de mí una mejor persona y porque me acompaña en todos mis sueños y metas.

A mis hermanos por estar siempre presentes y acompañándome con su ejemplo y por el apoyo moral que me han brindaron a lo largo de esta etapa y de toda mi vida.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	vi
LISTAS DE CUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
SIGLAS, ABREVIATURAS O GLOSARIO	x
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
REVISIÓN DE LITERATURA	2
CAPÍTULO I. CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN CAFETALES BAJO SOMBRA EN LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS.	17
1.1 RESUMEN	17
1.2 ABSTRACT	18
1.3 INTRODUCCIÓN	19
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS	22
1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
1.6 CONCLUSIONES	30
CAPÍTULO II. CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN ECOSISTEMAS FORESTALES Y SISTEMAS AGROFORESTALES.	31
2.1 RESUMEN	31
2.2 ABSTRACT	32
2.3 INTRODUCCIÓN	33
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS	36
2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
2.6 CONCLUSIONES	47
CONCLUSIONES GENERALES	48
LITERATURA CITADA	49

LISTAS DE CUADROS

Cuadro 1. Lluvia anual, tipo de suelo, concentración y cantidad de C en el suelo de algunos bosques templados del mundo.	7
Cuadro 2. Extensión, Producción Primaria Neta, y almacenes de C en la biomasa y en los suelos de los ecosistemas forestales del mundo.	9
Cuadro 3. Procedimientos para determinar el COS.	10
Cuadro 4. Definición de los almacenes de carbono.	15
Cuadro 5. Análisis de comparación de medias utilizando el método LSD de Fisher y un intervalo de confianza de 95%.	28
Cuadro 6. Coeficientes de variables dependientes.	29
Cuadro 7. Análisis de Varianza de las variables dependientes.	29
Cuadro 8. Descripción de los usos de suelo y vegetación del área de estudio.	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema conceptual del ciclo del carbono.	3
Figura 2. Ciclo global del C	4
Figura 3. Gradiente de intensificación de la producción cafetalera.	14
Figura 4. Almacenes de carbono en ecosistemas forestales.	14
Figura 5. Localización del área de estudio.	23
Figura 6. Contenido de COS (Mg ha ⁻¹) por tipo de vegetación natural o cafetal.	27
Figura 7. Localización del área de estudio.	36
Figura 8. Densidad de COS por grado de perturbación natural o antropogénica.	41
Figura 9. Densidad de COS en las tres fases por tipo de vegetación.	42
Figura 10. Sistema de clasificación de USV, escala 1:250,000.	43
Figura 11. Representación de la vegetación por su grado de perturbación.	44
Figura 12. Representación de cobertura de cada USV en la fases 1, 2 y 3 con su respectivo promedio de COS.	45

SIGLAS, ABREVIATURAS O GLOSARIO

AFOLU. Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de Suelo.

C. Carbono.

CC. Cambio climático.

CH₄ Metano.

CIS. Carbono inorgánico del suelo.

CO₂. Dióxido de carbono.

COLPOS. Colegio de Postgraduados.

CONAFOR. Comisión Nacional Forestal.

COS. Carbono orgánico del suelo.

DAP. Densidad aparente.

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

FG. Fracción gruesa.

GEI. Gas Efecto Invernadero.

Gt. Gigatonelada.

INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

IPCC. Panel Intergubernamental de Cambio.

LSD. Diferencia menos significativa (Least Significant Difference).

Mg. Megagrámo (tonelada).

MO. Materia orgánica.

MOS. Materia orgánica del suelo.

Msnm. Metros sobre el nivel del mar.

N₂O Óxido nitroso.

NOAA. Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica.

Pg. Petagramo = 10¹⁵ g = 10¹² kg.

PMC. Programa Mexicano del Carbono.

PPB. Producción Primaria Bruta.

ppm. Partes por millón.

PPN. Producción Primaria Neta.

INTRODUCCIÓN GENERAL

A nivel mundial existe una preocupación derivada del alarmante aumento en la emisión de gases que acentúan el efecto invernadero sobre la tierra que ha derivado en el calentamiento global del planeta. El bióxido de carbono (CO_2) es el principal gas que provoca este efecto, ocupa 0.03% del volumen atmosférico, pero es responsable de 64% del forzamiento radiativo, que provoca el calentamiento global (Myhre et al. 2013); de las 49 (± 4.5) Gt CO_2 eq año^{-1} antropógenas de gases de efecto invernadero (GEI) emitidas en 2010, el CO_2 sigue siendo el principal, representa el 76% (38 ± 3.8 Gt CO_2 eq año^{-1}) del total, de acuerdo con la quinta comunicación del Panel Intergubernamental de Cambio (IPCC), de ahí la importancia de limitar sus emisiones a la atmósfera. El Cambio climático se atribuye a la elevada concentración en la atmósfera de los GEI, por arriba de los niveles preindustriales. Después de la revolución industrial, el CO_2 aumentó casi 25% (Houghton, 2007), por lo que su concentración en la atmósfera pasó de 278 ppm (Maslin, 2014) a más de 412 ppm en la actualidad (NOAA, 2019). Este incremento en la concentración de CO_2 en la atmósfera se debe principalmente al uso de los combustibles fósiles y la producción de cemento, que emiten en conjunto 7.8 Pg C año^{-1} , y a los cambios de uso de suelo, con emisiones estimadas en 1.1 Pg C año^{-1} , (Ciais et al. 2013). Globalmente, entre 21 y 37% de las emisiones totales de GEI se producen en los sistemas agroalimentarios. Estas emisiones provienen principalmente del sector agrícola y las actividades de cambio de uso de la tierra (71%), el restante corresponde a las actividades de la cadena de producción: comercio, transporte, consumo, producción de combustibles, gestión de residuos, procesos industriales y empaque (Crippa et al. 2021). Los bosques pueden actuar como fuentes de emisiones de C cuando son perturbados (deforestaciones, incendios, enfermedades, etc.), de manera natural o por actividades humanas. Asimismo, los sistemas agroforestales (SAF) son una combinación de actividades que conjuntan agricultura, ganadería y silvicultura; tienen un importante potencial para mitigar el CC y fortalecer la adaptación local. Un caso particular de SAF representa la producción de café bajo sombra. Son una forma de manejo del territorio altamente diversa: las aportaciones de los diferentes SAF en la provisión de servicios ecosistémicos y de co-beneficios sociales aún requiere más investigación (Hernández et al. 2020).

REVISIÓN DE LITERATURA

Cambio Climático

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, en su artículo 1, define el Cambio Climático como “el cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” y diferencia entre el CC atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales. La quema de combustibles fósiles petróleo y derivados, carbón, gas natural (compuesto principalmente metano) y gas licuado del petróleo (propano y butano líquido), la deforestación y las actividades agropecuarias, entre otras, están cambiando la composición de la atmósfera terrestre, ya que se emiten a la atmósfera GEI como el CO₂, CH₄ y óxido nitroso (N₂O) que el planeta no puede absorber ni regresar a su condición normal en periodos cortos de tiempo. El CC se atribuye a la elevada concentración en la atmósfera, de los GEI por arriba de los niveles preindustriales. El CO₂ ha aumentado de manera importante a partir de la era industrial, debido al uso de los combustibles fósiles y a los cambios de uso de suelo, siendo el sector agropecuario el principal impulsor. Los bosques y selvas han sido derribados para convertirse en terrenos de cultivo y pastoreo de ganado.

Ciclo de carbono

El ciclo del C es importante debido a que el C forma la estructura de toda la vida en el planeta, representa alrededor del 50% del peso seco de los seres vivos, el del C se aproxima a los flujos de energía de la Tierra, el metabolismo de los sistemas naturales, humanos e industriales. Las plantas transforman la energía radiante en energía química en forma de azúcares, almidones y otras formas de materia orgánica (MO), y esta energía, ya sea en organismos vivos o en MO muerta, soporta las cadenas alimentarias en los ecosistemas naturales, en sistemas humanos, entre los cuales se encuentran las sociedades industriales habituadas (a las formas fósiles de energía para calefacción, transporte y generación de electricidad) (Chapman et al. 2020). El flujo de C a largo plazo

(1850-2020) debido a cambios en el uso de suelo es 156 Pg C liberados a la atmósfera, áreas abiertas a la agricultura, después de haber sido deforestadas pierden del 60 al 70% del C inicial contenido respecto a los bosques maduros; el sector Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de Suelo (AFOLU) es responsable del 24% de las emisiones totales de GEI a la atmósfera (Canfield et al. 2010).

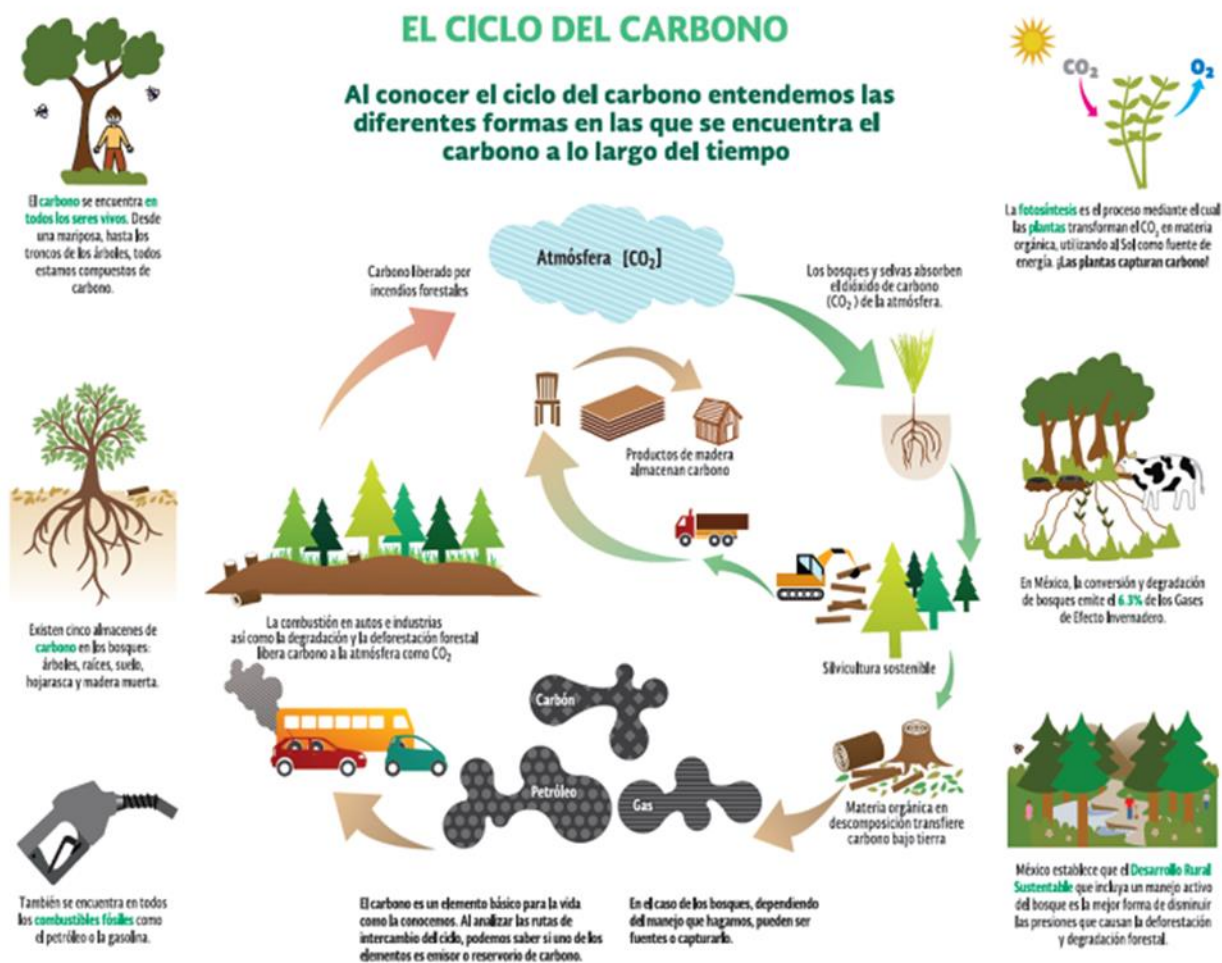


Figura 1. Esquema conceptual del ciclo del carbono.

Fuente: https://twitter.com/SEMARNAT_mx/status/620685447409332224, (consultado 02/dic/2021)

A lo largo de la historia de la Tierra, las principales formas de C en la atmósfera han sido el CO₂ y el CH₄, desempeñando papeles cruciales en el desarrollo de formas de vida y alteraciones del medio ambiente. La velocidad y alcance del calentamiento dependen, en parte del ciclo global del C. Por ejemplo, si la velocidad a que los océanos eliminan el CO₂ de la atmósfera, fuera más rápida y lo almacenan en la tierra disminuyeran, las

concentraciones de CO₂ aumentarían más rápidamente de lo previsto sobre la base de la historia reciente. A través de su transformación en la intemperie y la precipitación de carbonatos, suministra gran parte de las rocas sedimentarias de la Tierra y contribuye al ciclo de los volátiles a través de la litósfera (Houghton, 2013).

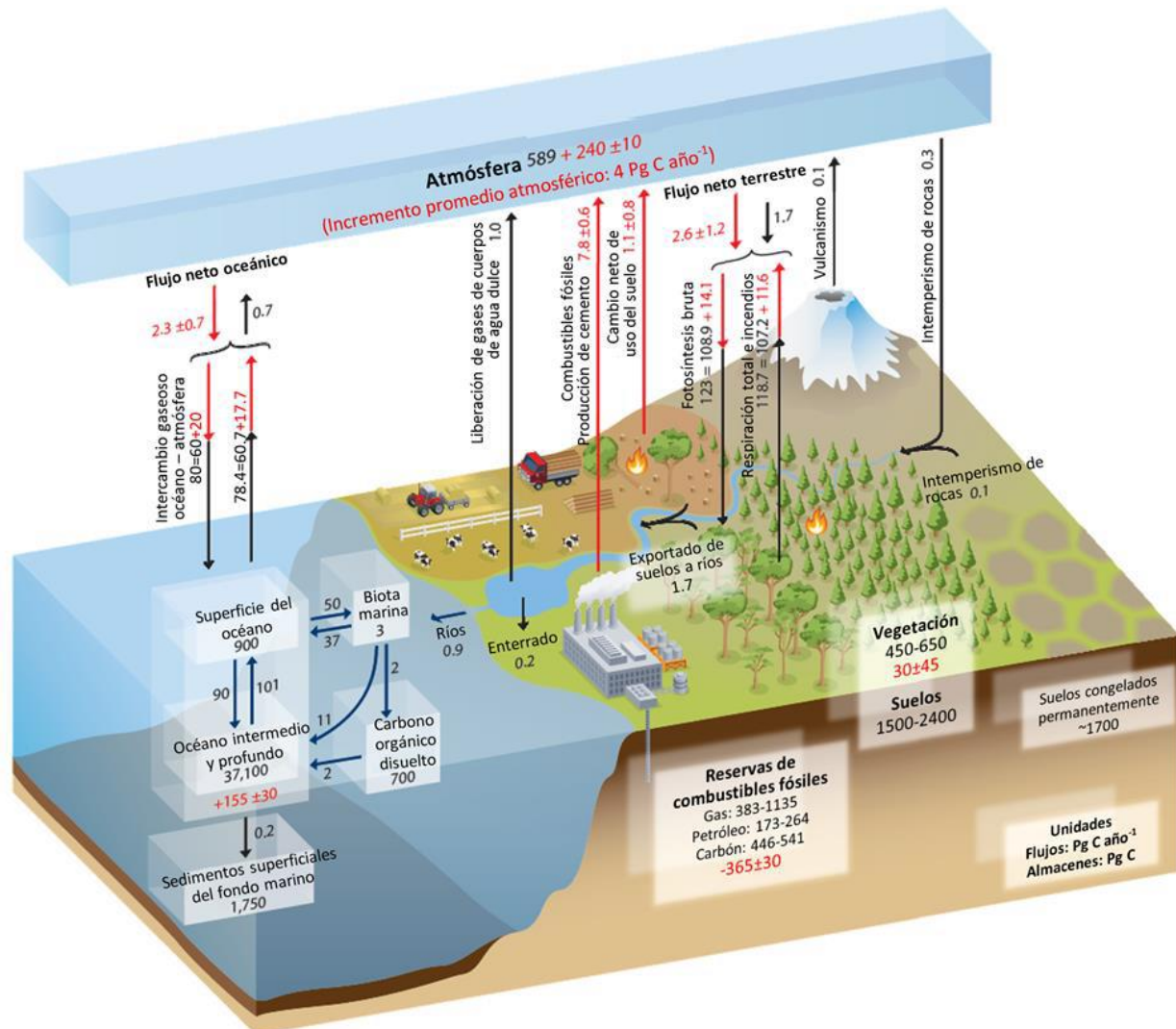


Figura 2. Ciclo global del C: Los grandes reservorios de C atmósfera, vegetación terrestre y suelo, océanos y reservas de combustibles fósiles. Los números y flechas en negro indican las masas de los reservorios y flujos estimados intercambiados en el periodo previo a la era industrial, alrededor de 1750 y en rojo los flujos posteriores a ese año. Por convención un cambio acumulado positivo significa que el reservorio ha ganado C desde 1750.

Fuente: Adaptado de Le Quéré et al. (2013).

Carbono en ecosistema forestales

Los ecosistemas forestales tienen un papel prioritario en el ciclo global del C y en el CC global por lo que resulta de gran importancia su conservación, ya que de acuerdo al Inventario Nacional de Emisiones de GEI, el sector AFOLU emiten el 19% del total estimado en el país (INECC, 2021). Sin embargo, en México no existen estadísticas forestales colectadas en forma regular y sistemática utilizando metodologías consistentes a lo largo del tiempo y manteniendo series históricas, por lo cual existe un alto grado de incertidumbre en estas estimaciones (Geissen et al. 2009). Debido a lo anterior, resulta de gran importancia definir metodologías de muestreo y de laboratorio consistentes y estandarizadas para la estimación de los almacenes de C en ecosistemas forestales para reducir el grado de incertidumbre en las estimaciones de GEI que se tiene en este sector. Las plantas remueven cada año, en cifras aproximadas, 110 Gt de C de la atmósfera, lo que constituye la producción primaria bruta (ppb) y casi la mitad de esta cantidad es devuelta a la atmósfera por el proceso de la respiración y la otra mitad forma los tejidos, las hojas, la madera y una pequeña parte se almacena en suelos para formar las raíces, esto es la PPN. La reserva global de C en el suelo asciende a 2,500 Gt y se divide en carbono inorgánico (CIS) y COS Burbano Orjuela, (2018), es 3.3 veces más grande que la reserva en la atmósfera (750 Gt) y 4.5 veces más grande (560 Gt) que la reserva en las plantas. Las plantas utilizan CO₂ y liberan O₂ durante la fotosíntesis. La cantidad de C fijado, cada año, por la fotosíntesis se estima de 35 a 60 Gt (Stockmann et al. 2013).

Carbono orgánico del suelo

La Guía de Buenas Prácticas del IPCC describe al almacén de COS como el C orgánico contenido en suelos minerales y orgánicos a una profundidad de 0.30 m, las raíces finas vivas (de tamaño inferior al límite de diámetro sugerido para la biomasa bajo el suelo) se incluyen con la MO del suelo cuando no pueden distinguirse empíricamente de ella; Gardi et al. (2021) mencionan que el COS es producto de la descomposición de plantas, el metabolismo de organismos vivos y el crecimiento bacteriano, se encuentra en forma de residuos orgánicos de vegetales, animales y microorganismos como humus y en formas muy condensadas de composición próxima al C elemental, es un componente importante

del ciclo global del C, ocupa 69.8 % del C orgánico de la biosfera, siendo un almacén de C muy importante y tiene gran potencial para incrementar sus acervos e incidir en la mitigación del CC; la disminución de este recurso, provocado, por la degradación de los ecosistemas y cambios abruptos de uso de suelo debido a actividades antropogénicas, es un proceso que disminuye la capacidad de la tierra para sustentar la vida humana. En los ecosistemas forestales, la captura de C depende del contenido inicial de C, las tasas de crecimiento, la edad y condición del rodal (los individuos jóvenes tienden a retener el C a tasas más altas en comparación con los árboles maduros), y la vida útil del árbol (el C es liberado a la atmósfera) (Andreu et al. 2009). La cantidad de C absorbido y almacenado depende de las condiciones del sitio, de la composición de especies y estructura, clima y manejo, así como entre ecosistemas y tipos de vegetación; el C modifica algunas propiedades físicas y químicas del suelo y características de éste, como su estructura, la profundidad de las raíces, la capacidad de agua almacenada disponible, la biodiversidad y los ciclos y reservas de los nutrientes; los procesos que causan la degradación del suelo son, el desplazamiento de algunos materiales a causa del agua y viento, el deterioro *in situ* por procesos físicos, químicos y biológicos; las principales causas no solo incluyen la agricultura, sino deforestación, remoción y quema de residuos que no permite la restitución adecuada de la MO (Islas et al. 2012). Por otra parte, las tierras agrícolas cubren 37% de la superficie terrestre (FAOSTAT, 2017) y el sector agrícola es globalmente el principal emisor de GEI distintos al CO₂. A nivel global, 1.8 mil millones de personas viven en tierras agrícolas (Zomer y Trabucco, 2014). Casi la mitad de esta población habita en tierras cuya cobertura forestal es mayor al 10%, lo que constituye un “bosque” según la definición de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Pequeños productores agrícolas con menos de 2 ha producen entre 30 y 34% de los alimentos del mundo, y con menos de 5 ha entre 44 y 48% de la producción alimentaria global (Ricciardi et al. 2018).

Porcentaje de COS

Es el valor de C orgánico obtenido en laboratorio como por el método de *Walkey-Black* para cada muestra de suelo, se expresa en porcentaje del peso total de suelo, para estimar de forma indirecta la densidad aparente (DAP) y para cuantificar directamente el

COS en términos gravimétricos (Mg ha^{-1}). La descomposición de los residuos de las plantas es crucial para el almacenamiento a largo plazo de la MO en el suelo, particularmente en el piso forestal (Wardle et al. 1997). Dicha descomposición está caracterizada por la disminución en la masa de los residuos vegetales y por cambios en la contribución relativa de diferentes clases de compuestos a través del tiempo (Kalbitz et al. 2006). El desarrollo de los suelos depende de la conjugación de diferentes atributos de los sitios, incluyendo el material parental, el relieve, el clima, la vegetación y el tiempo (Binkley y Fisher, 2013). El clima húmedo o subhúmedo y la vegetación boscosa en los suelos pueden presentar características comunes entre sí; dadas las condiciones de alta humedad atmosférica y baja evapotranspiración, los suelos son influenciados por la abundancia de humedad a lo largo del año, la cual promueve altas tasas de intemperismo químico de la fracción mineral y el desarrollo de condiciones anaeróbicas que generan suelos con alta acumulación de MO y COS (Benner et al. 2010).

Cuadro 1. Lluvia anual, tipo de suelo, concentración y cantidad de C en el suelo de algunos bosques templados del mundo.

Sitio	Temp (°C)	Lluvia (mm año ⁻¹)	Tipo suelo	C (Mg ha ⁻¹)	Referencia
Ixtlán de Juárez, Mex	12 - 17	800 - 1300	Acrisol Luvisol/	116	Saynes et al. 2012
Oaxaca, Mex	10 - 18	774 - 1974	Acrisol	133	Monreal et al. 2011
Michigan, USA	5 - 10	817	Spodosol	5-10	Gough et al. 2007
Ontario, Canadá	8	832	Luvisol	37	Peichl y Arain, 2006
Maine, USA	9 - 20	800 - 1500	Spodosol	70	Schulp et al. 2008
Michoacán, Mex	12 - 18	900 - 2000	Andosol	42 - 189	Ordóñez et al. 2008
Hidalgo, Mex	14	2047	Andosol Luvisol/	66 - 85	Avilés et al. 2009
Oaxaca, Mex	10 - 18	774 - 1974	Acrisol	90 - 133	González et al. 2010
Sierra Manantlán, Mex	16 - 22	1700	Regosol/ Feozem	146	Cruz y Etchevers, 2011
Veracruz, Mex	12	603 - 1175	Andosol	52 - 76	Gamboa y Galicia, 2011

Fuente: Saynes, 2013)

Reservorios de carbono en ecosistemas forestales

El contenido de C almacenado en la materia seca (biomasa) por efecto de la incorporación de este elemento durante la fotosíntesis es proporcional a la biomasa total acumulada, mientras que la captura de C corresponde al flujo que va de la atmósfera a la vegetación en una temporada de crecimiento, es decir, la tasa anual de C almacenado (Aguaron y McPherson, 2012). El C en la vegetación es la suma del contenido de la biomasa de las raíces y de la biomasa aérea, que comprende el tronco, las hojas, las ramas y el follaje (Yamallel et al. 2012). La producción de biomasa por las plantas es la mayor fuente de captura de C atmosférico (más del 90%), el crecimiento y sucesión de las comunidades vegetales juega una función importante en la dinámica del contenido actual de CO₂ y sus incrementos en el futuro (Yepes y Buckeridge, 2011). Varios estudios han utilizado ecuaciones alométricas para conocer la biomasa y el C de algunas especies de árboles, para obtener una estimación, primero a nivel árbol y después, se obtiene una estimación global, más confiable y directa en los sistemas vegetales. (Cortés et al. 2019). El contenido de C de los suelos se estima a partir del volumen del suelo considerado (profundidad), de la DAP y de la fracción de C determinada en laboratorio. En bosques se registraron valores entre 7 y 13% de fracción de C y en plantaciones con especies introducidas, valores inferiores (1.5 a 7%) (IPCC, 2006). Pan et al. (2011) mencionan que los bosques del mundo almacenan 861 Pg C, de los cuales 383 Pg se encuentran en el suelo (44%), 363 Pg en los árboles (42%), 73 Pg en la madera muerta (8%) y 43 Pg C se encuentran en el mantillo (5%); lo cual implica que casi la mitad del C de los ecosistemas forestales se encuentra en el piso forestal y el suelo, aunque depende del tipo de bioma; así, estimaron que los bosques tropicales almacenan el 56% del C en su biomasa y el 32% en el suelo, mientras que los bosques templados y boreales almacenan sólo el 20% del C en su biomasa y el 60% se encuentra en el suelo. De acuerdo a Pan et al. (2011), la captura de C en los bosques templados aumentó 17% del 2000 al 2007 comparado con el periodo 1990-1999 debido a incrementos en su biomasa y extensión. En México, se estima que el potencial de captura de C en la vegetación y suelos de los bosques templados es de 200 y 327 Mg C ha⁻¹, respectivamente (Monreal et al. 2011).

Cuadro 2. Extensión, Producción Primaria Neta, y almacenes de C en la biomasa y en los suelos de los ecosistemas forestales del mundo.

Ecosistemas Forestales	Extensión (10⁶ km²)	PPN (PgC año⁻¹)	C en biomasa (Pg C)	C en suelo (Pg C)
Bosques tropicales	17.5	20.1	340	692
Bosques templados	10.4	7.4	139	262
Bosques boreales	13.7	2.4	57	150
Tundra ártica	5.6	0.5	2	144
Matorrales mediterráneos	2.8	1.3	17	124
Sábanas tropicales pastizales	27.6	13.7	79	345
Pastizales templados	15	5.1	6	172
Desiertos	27.7	3.2	10	208
Humedales				450
Suelos congelados	25.5			400
Total	145.8	53.7	650	2947

Fuente: Sabine et al., (2004)

El almacén más estable después del océano es el suelo y también es el más difícil de incrementar, ya que se requiere un largo tiempo para conseguirlo. Los factores que determinan el potencial como sumidero del suelo son la profundidad, el peso, la textura, los tipos y combinaciones de arcillas presentes, el grado de humedad y el volumen ocupado por fragmentos gruesos donde el C orgánico no puede enlazarse fácilmente (Gardi et al. 2014).

Cuadro 3. Procedimientos para determinar el COS.

Tipo	Método	Proceso	Descripción
Cualitativos	NMK	Espectros copia de resonancia nuclear magnética	Compuestos de C son caracterizados en base a la energía absorbida y reemitida por los núcleos atómicos que se colocan en un campo magnético estático.
	DRIFT	Transformada de Fourier de la reflectancia infrarroja difusa	Compuestos de C son identificados en base a la absorción en el infrarrojo
Semicuantitativ	Oxidación húmeda	Peróxido de hidrógeno	Destrucción de la materia orgánica por oxidación húmeda, seguida de la determinación gravimétrica de la pérdida de peso de la muestra
	Combustión	Pérdida por ignición	Destrucción de la materia orgánica por combustión, seguida de la determinación gravimétrica de la pérdida de peso de la muestra
Cuantitativos	Oxidación húmeda	Oxidación con dicromato de Potasio (Walkley-Black, Springer y Klee)	Oxidación en húmedo seguido de la recolección y medición de CO ₂ desprendido
	Combustión	Combustión (COT)	Combustión en horno a alta temperatura (con o sin catalizador) seguido de la recolección y medición de CO ₂ desprendido

Fuente: Bolaños, (2015)

Sistemas agroforestales de café

La agroforestería implica el cultivo deliberado de árboles y arbustos con cultivos y/o animales en combinaciones interactivas para diversos objetivos, en una misma unidad de tierra, debido a los esfuerzos de investigación y desarrollo a nivel local, regional y global, se reconoce que ofrece mucho para la gestión sostenible de la tierra y la integridad ambiental (Nair, 2014). Es una práctica climáticamente inteligente que provee una variedad de productos y servicios (Ram et al. 2017); tiene potencial para mitigar el CC, fortalecer la adaptación local, integrar la conservación de la biodiversidad en la agricultura, y cumplir los Objetivos de Desarrollo del Milenio (Plieninger et al. 2020); pueden aumentar los almacenes de C en la biomasa (Chapman et al. 2020) e incorporar

MO a los suelos (Abbas et al. 2020). Más de 1200 millones de personas en el mundo la practican, ya que la integración de componentes que ocupan nichos complementarios y sus asociaciones aumenta la productividad agrícola si se gestionan de forma eficaz (Salimath et al. 2021); provee sombra y aumenta la humedad, controlando extremos micro-climáticos. Los ingresos adicionales y alimentos generados por productos forestales (leña, frutas, nueces) fungen como mecanismos de adaptación, (Gergel et al. 2020). Aumentan la productividad agrícola sin depender de insumos como fertilizantes inorgánicos y químicos para el manejo de plagas y enfermedades, simplemente con el uso de especies endémicas, aumentando la diversidad de predadores naturales (van Noordwijk, 2019). A pesar de estos beneficios, no es comúnmente promovida como sistema de manejo sustentable del paisaje (Therville et al. 2020). La mayoría de los países no incluyen la agroforestería en sus políticas públicas, estrategias de manejo territorial, planes de desarrollo o servicios de extensión, al contrario, se tiende a separar la agricultura para la producción de alimentos de la silvicultura, enfocada en la producción de madera y la provisión de servicios ambientales (Zinngrebe et al. 2020); formando barreras al fomento de la siembra de árboles en unidades agrícolas, previniendo el escalamiento de las actividades de agroforestería (Coe et al. 2014). La producción de café bajo sombra es un ejemplo de producción agroforestal climáticamente inteligente, ya que promueve el desarrollo bajo en emisiones de C y contribuye a la provisión de servicios ecosistémicos: almacenan cantidades de C comparables con la vegetación natural (Soto y Aguirre, 2015), con una riqueza de especies de plantas que se asemeja a los bosques y selvas que los albergan (Moguel y Toledo, 1999), mitigación del CC (Chapman et al. 2020), servicios hidrológicos (recarga de mantos acuíferos, mejora en la calidad del agua de los escurrimientos superficiales, disminución de caudales pico-disminución del riesgo de inundaciones aguas abajo-, conservación del caudal base en época seca) (van Noordwijk, 2019), conservación de suelos (erosión evitada, incremento de contenido de C orgánico y nitrógeno y fósforo disponibles) (Muchane et al. 2020), conservación de la agrobiodiversidad y especies polinizadoras (Cerdeira et al. 2020), además de fortalecer los sistemas de producción locales y medios de vida y medios de vida (Toledo y Moguel, 2012). La crisis generada por la roya del cafeto en 2012, puso en riesgo el estilo de vida de miles de familias de pequeños productores y causó severas

pérdidas económicas (Libert et al. 2020); como respuesta, en muchas zonas cafetaleras del país, se eliminó parcial o total de la sombra, propiciando un cambio en el uso del suelo para establecer milpa o pastizales para la ganadería, pero se afectaron los servicios ecosistémicos que este SAF provee (Perfecto et al. 2019); se llevó a cabo un cambio en las variedades cultivadas, sustituyendo a las variedades de café con alta calidad en taza, por otras con aparente resistencia a la roya pero con menor calidad (Ruiz y Merlín, 2021). Chiapas es el estado más representativo de la producción de café bajo sombra y orgánico en México, con más de 378 mil toneladas de café cereza, que representa 9.5% del cultivo (SIAP-SADER, 2021), cuyo producto gourmet de alta calidad asegura la provisión de servicios ecosistémicos y hábitats para la biodiversidad de flora y fauna (CEDRSSA, 2017), debido a lo cual resulta importante aportar información de esta zona productora. El café arábico y el café robusta representan el 99% de la producción mundial de café en grano. El café arábigo tiene mejor aroma y su producción ayuda a la conservación y cuidado de la biodiversidad y el café robusta es de raíz poco profunda y a cielo abierto, por lo que tiene menor precio (CEDRSSA, 2019.). La producción cafetalera en México se compone en 97% de café arábica. La mayoría de las variedades de *Coffea arábica* requieren de sombra provista por los árboles bajo los que crecen; pues los cafetos no toleran la luz solar directa, aunque se han desarrollado variedades que pueden cultivarse a pleno sol (CONABIO, 2015). La sombra de los cafetales representa importantes almacenes de C en la biomasa aérea y subterránea, cuya pérdida puede ser evitada a través de acciones concretas que impulsen su mantenimiento e incremento. El sistema de café bajo sombra produce mayor biomasa subterránea que el café cultivado a pleno sol. Hergoualc'h et al. (2012) hallaron que el SAF de café con especies de árboles y leguminosas tenía mayores reservas de C en el suelo que el monocultivo de café. Thomazini et al. (2015) encontraron que el COS es mayor en sitios con comunidades de vegetación desarrolladas, lo que puede atribuirse al aporte continuo de hojas, follaje y raíces muertas por los árboles de sombra y el café. Los estudios llevados a cabo sobre el potencial de captura de C en un SAF revelan que lineales simultáneos tienen un potencial significativo para almacenar más COS en comparación con las parcelas sin árboles o solo cultivos (Tumwebaze y Byakagaba, 2016). Los árboles de sombra en las plantaciones de café juegan un papel importante

para facilitar la captura de C y la conservación del suelo. Los SAF en los que se agregan grandes cantidades de MO al suelo, como los cafetos bajo sombra, tienen un mayor potencial para capturar C en el suelo en comparación con sistemas sin árboles. El COS está protegido contra la descomposición mediante estabilización en un SAF en comparación con el sistema de monocultivo (Schmitt et al. 2012). Los árboles de sombra favorecen a la captura C de la atmósfera, contribuyen a la mitigación del clima, los sistemas de policultivo tradicional almacenan C cuatro veces más que los de monocultivo sin sombra (van Rikxoort et al. 2014). Los sistemas de café de sombra se perciben como ecológicamente importantes en términos de captura de C, los árboles de sombra pueden proporcionar servicios ecosistémicos, como la regulación de plagas y enfermedades o captura de C, y contribuyen a la sostenibilidad del sistema de cultivo (Cerdeira et al. 2017).

Clasificación de los SAF de café

Las formas de manejo de SAF permiten identificar tendencias y características de cada sistema de producción como la diversidad de árboles de sombra o densidad de cafetos y la dimensión de la propiedad y el potencial uso de insumos agrícolas. Moguel y Toledo, (1999) clasifican los SAF de café con base en la altura de la sombra, el número de estratos de sombra, y la diversidad de especies empleadas como sombra (Figura 3). La producción de café se desarrolla en un amplio rango de sistemas de producción, donde los monocultivos de arbustos de café sin sombra están en un extremo, y los cafetales multifuncionales bajo sombra diversificada en el otro (Perfecto et al. 2019). Aun así, las contribuciones específicas del café bajo sombra a la sustentabilidad requieren de más estudios y precisiones; denominan gradiente de intensificación de la producción cafetalera a las diversas estructuras de cafetal correlacionadas con servicios ecosistémicos (Cerdeira et al. 2020), el manejo de plagas y enfermedades, la complejidad ecológica y el uso de insumos agrícolas (Merle et al. 2020). Las iniciativas para aumentar la productividad y responder a plagas y enfermedades han provocado la reducción en la superficie global del café bajo sombra en un 20% desde 1996 (Jha et al. 2014). (Figura 3).

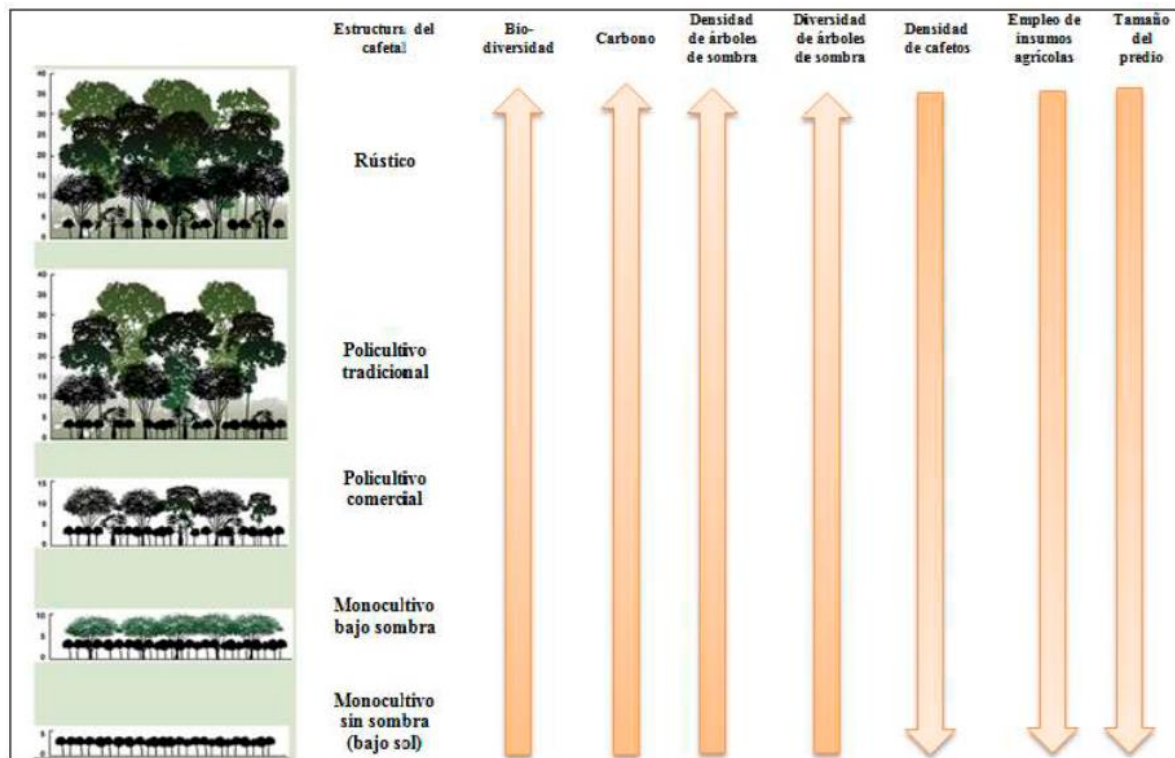


Figura 3. Gradiente de intensificación de la producción cafetalera.

Fuente: Perfecto et al. (2019).

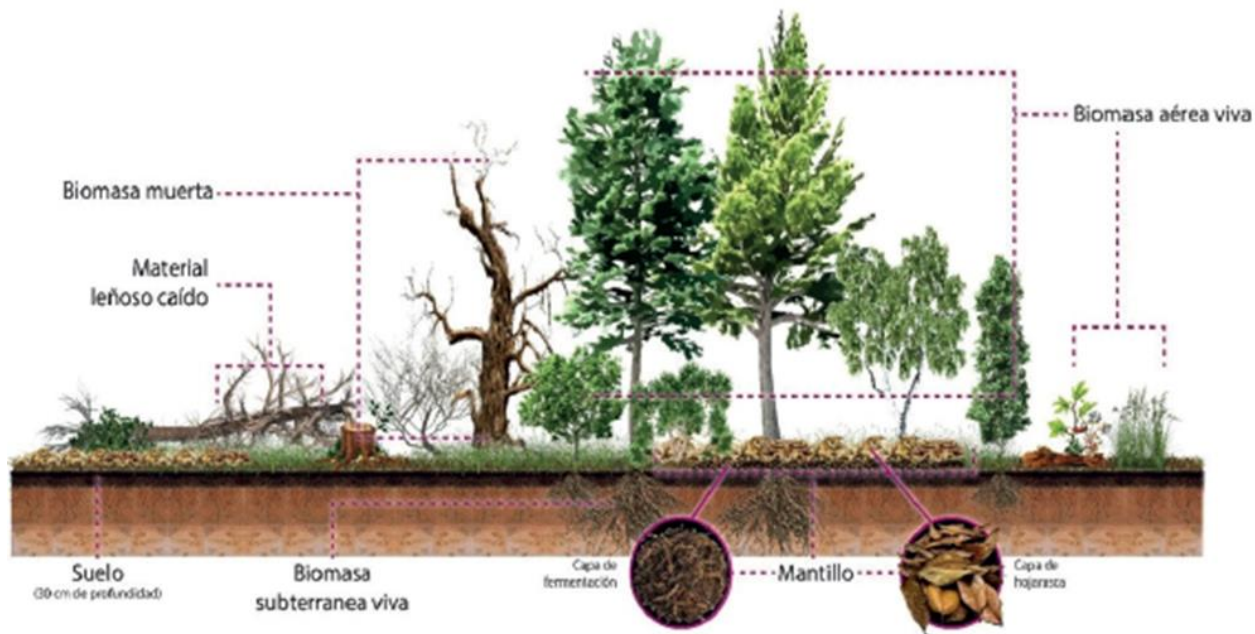


Figura 4. Almacenes de carbono en ecosistemas forestales

Fuente: (PMC, Guía de buenas prácticas.)

Cuadro 4. Definición de los almacenes de carbono.

Almacén	Definición	Compartimientos	Observaciones
Biomasa viva sobre el suelo	Toda la biomasa viva que se encuentra sobre el suelo, con inclusión de tallos, ramas, corteza, semillas y follaje	1.-Arbóreo 2.-Arbustivo 3.-Herbáceo	Se estima el contenido de C en los tres estratos
Biomasa viva debajo el suelo	Toda la biomasa de las raíces viva	Único	Se estima el contenido de C en el estrato arbóreo
Carbono orgánico del suelo (COS)	Comprende el C contenido en la materia orgánica del suelo a una profundidad de 30 cm	Único	Se elimina la fracción gruesa (partículas con diámetro superior a 2 mm)
Mantillo	Comprende toda la biomasa no viva con un diámetro inferior a 7.5 cm, que yace muerta, en varios estados de descomposición sobre el suelo. Comprende las capas de detritus, fúmica y húmica.	1.-Hojarasca (detritus) 2.-Capa de fermentación	Se incluye el material leñoso caído con diámetro inferior a 7.5 cm y hojarasca (O1) principalmente. En la capa de fermentación se incluyeron los horizontes intermedios (Oe) y húmico (Oa)
Madera muerta	Comprende toda la biomasa boscosa no viva, no contenida en el mantillo, en pie o en el suelo	1.-árboles muertos en pie 2.-Tocones 3.-Material leñoso caído	Comprende la madera muerta que se encuentra en la superficie, raíces muertas, tocones y árboles muertos en pie de 7.5 cm de diámetro o más

Fuente: (PMC, Guía de buenas prácticas.)

Cadenas de valor para la producción de café

Los escenarios de CC incrementan la productividad para alimentar una población creciente sin aumentar las emisiones; se prevé una pérdida de 50% en las áreas aptas para la producción de *Coffea arabica* a nivel global para el año 2050 (Bunn et al. 2015), esto es, menos café, menos sabor, menos aroma, y mayores precios. Por su parte, las cadenas de valor del café se enfocan en la productividad y en la calidad del producto final. El café busca diversificar sus mercados y alcanzar distintos segmentos de consumo

al educar sobre los valores de cada variedad de café, los efectos de los microclimas sobre el producto final y los procesos de organización de los productores. El análisis de cadenas de valor permite añadir a la clasificación de SAF de café canales de venta, variedades idóneas, productividad y precio pagado al productor. Sin embargo, existen muy pocas cadenas de valor desarrolladas para el café que conectan los SAF con consumidores y mercados (Middendorp et al. 2020). Esto representa una barrera para la difusión de soluciones basadas en la naturaleza y para la adopción de innovaciones técnicas en la parcela (Bartlett, 2021).

CAPÍTULO I. CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN CAFETALES BAJO SOMBRA EN LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS.

1.1 RESUMEN

Uno de los objetivos de la política ambiental para abordar el CC es la captura de C de bajo costo, así como la producción de café bajo sombra, considerada una actividad climáticamente inteligente. El presente trabajo aporta información sobre la capacidad de almacenamiento de COS en la Sierra Madre de Chiapas (SMC), en sistemas de producción de café bajo sombra de vegetación natural y cultivo de maíz. El COS se estimó de 0 a 30 cm de profundidad, separando las partículas mayores a 2 mm de diámetro. A nivel de ecosistema, la vegetación secundaria arbórea de la selva mediana perennifolia tuvo la mayor reserva de COS ($103.22 \text{ Mg ha}^{-1}$) y el bosque de pino-encino la menor (26.86 Mg ha^{-1}); en tanto el cultivo de maíz reportó un contenido de $31.25 \text{ Mg C ha}^{-1}$. En sistemas productivos de café, el rústico obtuvo la mayor reserva ($113.23 \text{ Mg ha}^{-1}$) y el monocultivo bajo sombra la menor (71.15 Mg ha^{-1}). Se propuso un modelo en función los contenidos de C en la capa de hojarasca y horizonte de fermentación, porcentaje de cobertura arbórea (sombra), la pendiente y altitud, que explicó el 23.59% de la variabilidad en el contenido de COS en estos sitios. Las variables con mayor influencia fueron el almacén de C de la capa de hojarasca y la altitud, que resultaron estadísticamente significativas. El porcentaje de cobertura de vegetación arbórea y la sombra en los sistemas de producción de café resultaron ser no estadísticamente significativos.

1.2 ABSTRACT

Shade-grown coffee production is considered a climate-smart activity because it captures low-cost carbon (C), which is one of the objectives of environmental policy to face the climate change. The present research provides information on soil organic carbon (SOC) sequestration capacity in Chiapas Sierra Madre (SMC) locations, mainly in coffee production systems under natural vegetation shade and in maize cultivation. SOC was estimated from 0 to 30 cm depth, by separating the coarse fraction, particles larger than 2 mm in diameter. At the ecosystem stage, the medium evergreen forest secondary treed vegetation had the highest SOC stock ($103.22 \text{ Mg ha}^{-1}$) and the pine-oak forest the lowest (26.86 Mg ha^{-1}); whereas a maize crop presented a C stock of 31.25 Mg ha^{-1} . In coffee production systems, the rustic system had the highest stock ($113.23 \text{ Mg ha}^{-1}$) and the shaded monoculture had the lowest (71.15 Mg ha^{-1}). A model was suggested as a function of the C stock in the mulch layer and fermentation horizon, tree cover percentage (shadow), the slope and the elevation, which explained 23.59% of the variability in the SOC stock in the sample sites. C stocks in the mulch layer and the elevation were the most statistically significant variables. Tree vegetation cover percentage and shadow in coffee production systems showed no statistical significance.

1.3 INTRODUCCIÓN

El suelo es el material mineral u orgánico natural no consolidado de la superficie de la Tierra que ha sido influenciado por el material parental, el clima, los macro y microorganismos y el relieve, todos actuando durante un período de tiempo para producir un material diferente del que fue derivado en muchas propiedades físicas, químicas, biológicas y morfológicas (Gregorich et al. 2001). Se define el suelo en función de los servicios ecosistémicos que proporciona y respalda, como los servicios de regulación, que juegan un papel importante en el ciclo global del C, puede ser un sumidero o fuente de CO₂ (además de CH₄ y N₂O) dependiendo en parte de su manejo. La MOS consiste en una mezcla de residuos de origen vegetal, animal o microbiano en diversas etapas de descomposición, y de nuevas moléculas sintetizadas por microbios, y su acumulación en los suelos refleja el equilibrio entre la entrada de hojarasca vegetal y derivados de las raíces y las pérdidas a través de la respiración microbiana, la erosión y la lixiviación; las reservas de C pueden variar ampliamente entre los suelos y el paisaje en función del material geológico original, el clima, la vegetación y la topografía. (Krizc et al. 2021). El COS es el componente principal de la MOS, el contenido de C de la MOS va de 50% a 58% (Jensen et al. 2019). El suelo es el principal reservorio de C ya que contiene entre 1500 y 2000 Pg. Se estima que el almacén de COS, a un metro de profundidad, es de 1500 Pg (Batjes et al. 2017), tres veces mayor que la vegetación (550 Pg C) y dos veces mayor que la atmósfera (760 Pg) (Eswaran et al. 1993). El COS juega un papel crucial para muchas funciones del suelo y servicios de los ecosistemas, afecta las propiedades químicas y físicas de éste, como la capacidad de infiltración del agua, y retención de humedad, la disponibilidad de nutrientes y la actividad biológica de los microorganismos (Schjønning et al. 2018). Los efectos del clima, específicamente la humedad y la temperatura, controlan principalmente la acumulación de COS a partir de su efecto, tanto en la PPN como en la descomposición (Horwath, 2007). Las estrategias para aumentar la reserva de C del suelo incluyen restauración del suelo y regeneración de bosques, agricultura sin labranza, cultivos de cobertura, manejo de nutrientes, aplicación de abonos, pastoreo mejorado, conservación y cosecha del agua, riego eficiente, prácticas agroforestales y de cultivos energéticos en tierras sobrantes (Lal, 2004).

En regiones montañosas, la acumulación de COS se rige principalmente por la naturaleza y el tipo de vegetación, así como por la altitud, debido a que esta última influye en gran medida en los factores climáticos, principalmente la temperatura y la humedad (Dar y Somaiah, 2015). El clima tiene influencias directas sobre el tipo y la cantidad de vegetación, las tasas de meteorización y la intensidad de la lixiviación, lo que determina la cantidad y calidad del COS y la calidad del suelo (Sinoga et al. 2012). Bhattacharyya et al. (2008) encontraron que en India hubo incremento en el contenido de COS con el aumento de la precipitación, pero una disminución de éste con el aumento de la temperatura. El COS se incrementa con el aumento del contenido de limo y arcilla (Yost y Hartemink, 2019). En los ecosistemas forestales y agroforestales el C se distribuye en cinco almacenes: biomasa aérea, biomasa subterránea, suelo, madera muerta y mantillo (Maciej et al. 2003). En este estudio únicamente se midió el almacén del suelo, incluyendo los factores que determinan su capacidad de almacenamiento: la profundidad, el peso del suelo, la textura, los tipos y combinaciones de arcillas presentes, el grado de humedad y el volumen ocupado por fragmentos gruesos, donde el C orgánico no puede enlazarse fácilmente (Gardi et al. 2014). Los SAF son sistemas de uso de la tierra donde especies leñosas perennes se usan y manejan junto con cultivos agrícolas y animales; se producen interacciones ecológicas y económicas entre los componentes que son resultado de los arreglos espaciales y temporales; son importantes reservorios de C en el tiempo, mismos que dependen de la productividad, la finalidad para la cual se hayan diseñado y las condiciones ambientales bajo las cuales se desarrollan, además de ser una fuente de alimento para los dueños y proporcionar alimento para animales (Nair, 1993). El cultivo café es tradicionalmente cultivado bajo sombra densa y diversa en un SAF; son sistemas complejos donde el cultivo interactúa con una o más especies de árboles (Chain et al. 2021); existe una relación entre la estructura arbórea y el estrato arbustivo de plantas de café; aunque, a pesar de ser en general un sistema contenedor de deforestación, la inserción del café en el bosque implica un manejo y con ello un cambio de uso de suelo, por lo que en algunas regiones la expansión de su cultivo hacia zonas boscosas representa una amenaza (Hoang y Kanemoto, 2021). La cafecultura en México se presenta bajo diversos sistemas de cultivo de café, con una gran diversidad entre pequeños y grandes productores, café bajo sombra y café bajo sol, orgánico o

convencional, etc., que difieren en sus impactos ambientales; mientras que contribuyen a conservar suelos, crear hábitat para flora y fauna y capturar C, entre otros (PMC, 2016). En la estructura del cafetal se pueden distinguir dos elementos principales: 1) la sombra del cafetal que es provista por el dosel de las especies arbóreas y 2) la plantación de cafetos (Hernández, 2008.). Para clasificar un cafetal se analizan las diferentes especies de árbol y se miden los niveles o estratos que se distinguen en las copas de los árboles o dosel, siendo la clasificación más utilizada la propuesta por Moguel y Toledo 1999), identifica cinco principales sistemas de producción de café: dos tradicionales donde el café se produce bajo la sombra de la vegetación originaria, el rústico y el policultivo tradicional, uno intermedio donde la sombra la proveen árboles no nativos (policultivo comercial) y dos con mayor manejo (monocultivos con o sin sombra). (Libert, 2018) describe a los sistemas de producción de café rústicos como cafetales sembrados en el sotobosque, empleando el dosel de la selva tropical, cuenta con una baja densidad de cafetos, sombra alta y diversa, con especies endémicas, varios estratos o niveles de sombra y conserva un mayor número de especies nativas. El policultivo tradicional emplea una mezcla de cafetos y especies útiles, como árboles frutales o maderables, manteniendo especies endémicas y diversos estratos de sombra que llegan a rebasar 15 m de alto. En un policultivo comercial bajo sombra, la cobertura forestal inicial es remplazada por especies introducidas, útiles para la cafeticultura (árboles de leguminosas del género *Inga*, por ejemplo) y con otros usos comerciales (aprovechamiento maderable, frutales, etc.). La densidad de cafetos aumenta y disminuyen los estratos de sombra; la altura es inferior a 15 m (dependiendo del tipo de vegetación). En el monocultivo bajo sombra, se siembran árboles de sombra (comúnmente de una sola especie) de menos de 10 m de altura, con una mayor densidad de cafetos. El monocultivo a pleno sol no emplea árboles de sombra. El presente trabajo aporta información sobre la capacidad de almacenamiento de COS de los diferentes sistemas de producción de café bajo sombra en sitios de la SMC, teniendo como referencia las reservas en este mismo almacén en sistemas de producción de café a pleno sol, ecosistemas de vegetación natural y cultivo de maíz; así como de los factores que influyen en las reservas de COS en estos sitios.

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

1.4.1 Ubicación de la zona de estudio.

La SMC es una cadena montañosa de 250 km (212,500 ha), ubicada al sur de México; presenta una diversidad de ecosistemas como selvas secas, selvas medianas, bosques de niebla y bosques de pino-encino, hábitats de gran importancia para la conservación de la biodiversidad (Cortina et al. 2012). Las principales actividades económicas son la producción de café, maíz, mango, cacao, plátano, y ganadería (Schroth et al. 2009). La mayor parte de la SMC se categoriza como área natural protegida, incluyendo las Reservas de la Biosfera de La Sepultura, El Triunfo y Volcán Tacaná; y el Área de Protección de Recursos Naturales La Frailescana CONANP, (2019). El área de estudio comprendió los municipios de Acacoyagua, Ángel Albino Corzo, Amatenango de la Frontera, Bella Vista, Cacahoatán, Chicomuselo, Escuintla, Frontera Comalapa, Huehuetán, Huixtla, La Concordia, Mapastepec, Montecristo de Guerrero, Motozintla, Pijijiapan, Siltepec, Tapachula, Tuzantán, Unión Juárez, Villa Comaltitlán, Villa Corzo y Villaflores; donde el 85% de la superficie corresponde a diferentes tipos de bosques y selvas, tanto primarios como secundarios INEGI, (2016.), con una alta proporción de bosques de niebla, que destacan por su gran importancia ecosistémica. Incluyó pequeños productores (con superficies <2 ha) y propietarios de fincas (>100 ha). El rango altitudinal de las parcelas osciló entre 370 y 1,568 msnm con diferentes condiciones climáticas y topográficas (Figura 5).

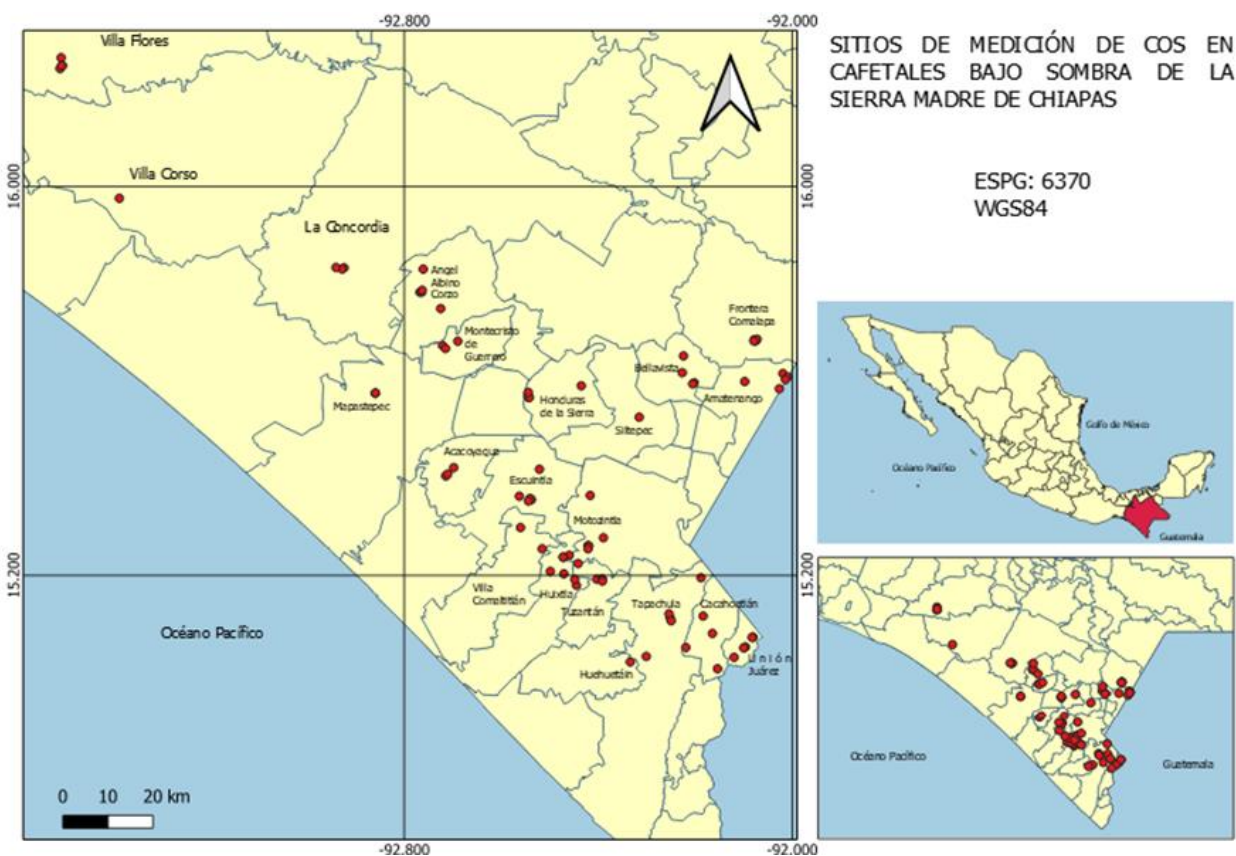


Figura 5. Localización del área de estudio.

1.4.2 Sitios de medición

Se establecieron 76 parcelas circulares de muestreo de 1000 m², en el centro de cada parcela se tomaron las muestras de mantillo, capa de fermentación y suelo. Los sitios de muestreo incluyeron mediciones en SAF de cafetal *tradicional*: *Borbón* y *árabe* orgánico y natural, cafetal renovado con *Catimor* (*Costa Rica 95*, *Lempira*, *Oro Azteca*) con y sin irrigación, con y sin agroquímicos, cafetal *Robusta*, cafetal *Catimor* en pastizal, cafetal *Catimor* en expastizal, pastizal en cafetal, maizal en excafetal y bosque poco perturbado. Se levantó un inventario de almacenes de C, de acuerdo a los lineamientos la Guía de Buenas Prácticas del IPCC, y se cuantificó el contenido del COS de acuerdo al Manual de Procedimientos Inventario de Carbono + (PMC, 2016). La sombra de los cafetales se integró principalmente por: *Alchornea latifolia*, *Astronium graveolens*, *Bambusa vulgaris*, *Byrsonima crassifolia*, *Cletrha nicaraguensis*, *Conostegia xalapensis*, *Cordia alliodora*, *Cordia curassavica*, *Inga eriocarpa*, *Inga flexuosa*, *Inga jinicuil*, *Inga micheliana*, *Inga paterna*, *Inga punctata*, *Lantana camara*, *Liquidambar styraciflua*, *Heliocarpus*

donnellsmithii, *Ostrya virginiana*, *Quercus benthamii*, *Quercus acutifolia*, *Quercus magnoliifolia*, *Tabebuia chrysantha*, *Terminalia amazonia*, *Trichilia hirta* L., *Ulmus mexicana*, *Vernonanthura deppeana*, *Yuca gigantea*; por citar solo algunas especies del estrato arbóreo principal.

1.4.3 Metodología

Trabajo en campo

Se utilizó la metodología descrita en el manual de campo del Inventario Forestal Estatal Cuantitativo y de la “Propuesta para el establecimiento de un Sistema Nacional de Monitoreo de la dinámica del C en ecosistemas forestales de México” (PMC, 2016). En relación a los datos sobre el contenido del C del suelo se realizó un muestreo cuantitativo y sistemático. Para obtener la DAP, se limpió la superficie del suelo de la fracción vegetal no enraizada al suelo (30 x 30 cm), utilizando un cilindro recto de acero. Todo el material extraído se colocó en una bolsa, se pesó en el sitio (peso fresco) y se etiquetó para llevarse a laboratorio y obtener el peso de suelo seco utilizando una balanza marca *AND HF 2000G* después de secarse en la estufa, marca *Thomas Scientific* por 48 horas. Posteriormente se obtuvo una submuestra de 5 gramos utilizando una balanza de precisión *Mettler Toledo MS*, la cual se tamizó en malla 100 y se colocó en un sobre de papel con su respectivo código de identificación.

Trabajo de laboratorio

Se consideró en el cálculo del contenido de C una profundidad de 0.30 m. El porcentaje de fracciones gruesas se obtuvo secando, moliendo y tamizando el suelo de las muestras en una malla 10, con abertura de 2 mm, para conseguir el peso de ambas fracciones (gruesa y fina) y calcular su porcentaje. Posteriormente, se obtuvo una submuestra de 5 g, la cual se tamizó en malla 100 y se colocó en un sobre de papel con su respectivo código de identificación. El contenido de C de cada muestra se obtuvo utilizando el equipo analizador automático *Shimadzu 5050A* del Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental del Colegio de Postgraduados.

El COS se estimó utilizando la Ecuación (1), de acuerdo a la Guía de Buenas Prácticas (IPCC. 2016).

$$\text{COS} = \text{DAP} \cdot \text{P} \cdot 10000 \cdot \text{COSp} (1 - \text{FG}/100) \quad \dots(1)$$

Dónde:

COS = Carbono Orgánico en el Suelo (Mg ha^{-1})

DAP = Densidad aparente del suelo (Mg m^{-2})

P = Profundidad del suelo (m)

FG = Fracciones gruesas, $>2\text{mm}$ (%)

COSp = Contenido de carbono orgánico, en %

10000 = Factor de escala, $\text{m}^{-2} \text{ha}^{-1}$

1.4.4 Análisis estadístico

Para conocer, en perspectiva, el contenido de COS en los sitios con sistemas de producción de café bajo sombra se compararon las estadísticas básicas y se realizó una comparación de medias con otros usos del suelo. Posteriormente, se propuso un modelo en función de variables independientes que explican los contenidos de COS encontrados en los sitios de medición. Se utilizó un intervalo de confianza del 95% para realizar el análisis de comparación de medias y determinar diferencias significativas. Se agrupó la información utilizando el método de la diferencia mínima significativa o método SLD (*Least Significant Difference*) de Fisher, técnica de comparación introducida por Fisher en 1935 (Williams, 2010). Para determinar si las variables independientes se ajustan al modelo y que tanto influyen en la variable dependiente COS, se empleó el modelo de regresión múltiple. Finalmente se realizó un análisis de varianza para evaluar la sensibilidad del modelo propuesto a las variables independientes.

1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El contenido de COS varió en cada tipo de cafetal o vegetación natural, suele depender del tipo de vegetación, el clima, la humedad, la temperatura y los tipos de suelo (Bhandari y Bam, 2014). Este estudio mostró que el contenido de COS es influenciado por factores como la altitud (clima) y el contenido de C en la capa de hojarasca (Cuadro 6).

1.5.1 Análisis de comparación de medias.

En la Figura 6 se muestra la distribución de los valores del contenido de COS expresado en Mg ha^{-1} de los 76 sitios de medición. Además, se pueden observar los valores máximos y mínimos medidos, así como los valores atípicos y la cantidad de muestras de cada tipo de cafetal o vegetación.

El mayor contenido de COS se presentó en el tipo de cafetal rústico con $113.23 \text{ Mg C ha}^{-1}$, seguido de la selva mediana perennifolia $103.22 \text{ Mg C ha}^{-1}$, después selva mediana subperennifolia $81.29 \text{ Mg C ha}^{-1}$; el policultivo comercial bajo sombra tuvo una reserva promedio de $74.19 \text{ Mg C ha}^{-1}$, monocultivo bajo sombra $71.16 \text{ Mg C ha}^{-1}$, bosque mesófilo de montaña $54.71 \text{ Mg C ha}^{-1}$, maíz $31.35 \text{ Mg C ha}^{-1}$ bosque de encino $27.57 \text{ Mg C ha}^{-1}$, y al final el bosque de pino-encino $26.86 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Asimismo, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre el contenido de COS almacenado en policultivo comercial bajo sombra y monocultivo bajo sombra, sus medias resultaron prácticamente iguales. Adicionalmente, con un intervalo de confianza del 95%, se puede decir que las medias de ambos sistemas de producción de café resultaron sin diferencias significativas ($p < 0.05$) respecto al contenido de COS del bosque mesófilo de montaña. Finalmente, no se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los contenidos de COS de los tipos de vegetación natural bosque de encino y bosque de pino-encino. Es importante mencionar que este tipo de vegetación se encontró en suelos poco profundos, menor a los 30 cm definidos como profundidad de muestreo, lo que limita la cantidad de COS que pueden almacenar de acuerdo a lo definido en la Ecuación 1. Ambos tipos de vegetación tuvieron contenidos de COS similares al cultivo de maíz.

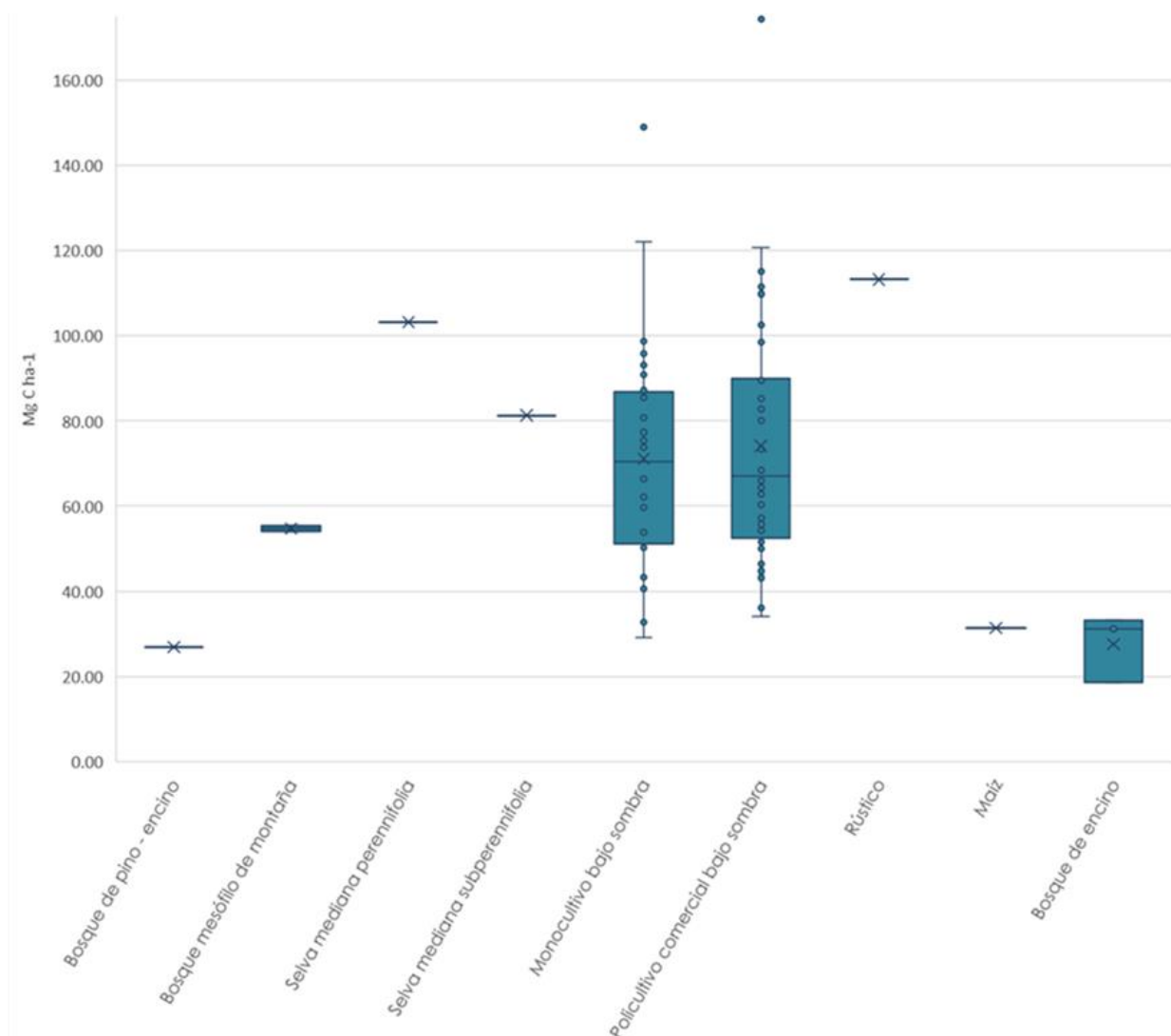


Figura 6. Contenido de COS (Mg ha-1) por tipo de vegetación natural o cafetal.

En el Cuadro 5 se muestran los resultados de la comparación de medias, en función de los cuales se puede decir, con un nivel de significancia del 5%, que el contenido de COS almacenado en los cafetales rústicos no tuvo diferencias significativas ($p < 0.05$) respecto al COS almacenado en los tipos de vegetación natural más productivos (selva mediana perennifolia y subperennifolia), incluso, fue ligeramente superior, aunque fueron muy pocos los sitios medidos en los tres casos. Resultó muy complicado ubicar sitios de producción de café rústico, actualmente esta forma de producir está restringida (Villavicencio y Valdez 2003).

Cuadro 5. Análisis de comparación de medias utilizando el método LSD de Fisher y un intervalo de confianza de 95%.

Tipo de café/Vegetación	N	Media	Agrupación
Rústico	1	113.231	A
Selva mediana perennifolia	1	103.228	A
Selva mediana subperenifolia	1	81.298	A
Policultivo comercial bajo sombra	37	71.490	B
Monocultivo bajo sombra	28	71.160	B
Bosque mesófilo de montaña	2	54.719	B
Maíz	1	31.357	C
Bosque de encino	3	27.577	C
Bosque de pino-encino	1	26.868	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Respecto a la vegetación natural, se observó que se encuentran por debajo de los valores reportados en otros estudios, por ejemplo: 1) de Jong et al. (1997) para bosque de encino y bosques de pino- encino en los altos de Chiapas, ya que reportan una densidad de 172.6 Mg C ha⁻¹ y 174.4 Mg C ha⁻¹ respectivamente; o lo reportado por 2) Chenu et al. (2015) de 118 Mg C ha⁻¹ en bosques de México: o en bosques de Ixtlán, Oaxaca, 3) Saynes et al. (2012) encontró una densidad de 116 Mg C ha⁻¹. 4) PMC, (2016), en la Selva Mediana 188.4 Mg C ha⁻¹.

1.5.2 Modelo propuesto para la estimación del COS

De acuerdo a los resultados encontrados por otros autores (Horwath, 2007; Dar y Somaiah, 2015; Dahlgren et al. 1997 y Sinoga et al. 2012 se propuso un modelo en función de variables independientes que explica el contenido de COS encontrado en los sitios de medición, a saber: contenidos de C en las principales fuentes de ingreso (capa de hojarasca y horizonte de fermentación), porcentaje de la cobertura de vegetación arbórea (sombra del cafetal) como indicador de la PPN (Prentice et al. 2001) y la producción de hojarasca del sitio (Hernández et al. 2017), pendiente del sitio (factor de acumulación de materia orgánica) y altitud (evalúa de manera indirecta la influencia del clima en las tasas de descomposición de la MO. Los resultados de la regresión múltiple se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Coeficientes de variables dependientes.

Término	Coef	EE del coef	Valor T	Valor p
Capa de hojarasca	-6.57	2.86	-2.30	0.025
Horizonte de fermentación	-0.93	1.10	-0.85	0.399
Sombra (%)	-0.06	0.18	-0.33	0.742
Pendiente (%)	0.35	0.19	1.89	0.063
Altitud	0.03	0.01	3.58	0.001

El modelo propuesto se expresa en la Ecuación (2).

$$\text{COS} = 51.60 - 6.57 \text{ capa de Hojarasca} - 0.93 \text{ Horizonte de Fermentación} - 0.06 \text{ Sombra (\%)} + 0.35 \text{ Pendiente (\%)} + 0.029 \text{ Altitud (msnm)} \dots(2)$$

En el Cuadro 7 se muestra el análisis de varianza de los factores independientes, en el que se observa que el contenido de C en la capa de hojarasca y la altitud influyen de manera positiva e importante en el contenido de COS.

Cuadro 7. Análisis de Varianza de las variables dependientes.

Fuente	GL	SC ajust	MC ajust	Valor F	Valor p
Regresión	1	12290.1	24.58.01	4.29	0.002
Capa de hojarasca	1	3030.7	3030.68	5.29	0.025
Horizonte de fermentación	1	412.6	412.63	0.72	0.399
Sombra (%)	1	62.5	62.45	0.11	0.742
Pendiente (%)	1	2044.4	2044.35	3.57	0.063
Altitud (msnm)	1	7343.1	7343.14	12.82	0.001
Error	66	37809.8	572.88		
	71	50099.8			

Resumen del modelo: $S = 24.653$; $R^2 = 23.59\%$; R^2 (ajustado) = 14.33%

El modelo de regresión indica el grado de efectividad que tienen las variables independientes en explicar la variable dependiente COS; ajusta a los datos en un 23.59% muy por abajo si se compara con un $R^2 = 67\%$, reportado en otro modelo Dar y Somaiah, (2015); sin embargo, coinciden en que el COS tiene una tendencia creciente con el aumento de la altitud, debido a su relación con los factores climáticos, principalmente la temperatura y la humedad. El efecto del porcentaje de sombra no fue significativo.

1.6 CONCLUSIONES

El COS almacenado en los sistemas de producción de café resultó igual o superior a algunos tipos de vegetación natural. El tipo de cafetal rústico no tuvo diferencias significativas respecto al COS almacenado en los tipos de vegetación natural más productivos de la zona de estudio (selva mediana perennifolia y selva mediana subperennifolia), incluso, presentan una media superior los primeros. Los contenidos de COS almacenado en policultivo comercial bajo sombra, monocultivo bajo sombra y bosque mesófilo de montaña resultaron ser similares, de acuerdo a la comparación de medias con un nivel de significancia del 5%. Todos los sistemas de producción de café bajo sombra almacenaron mayor cantidad de COS en relación a la vegetación natural de bosque de encino y el bosque de pino-encino. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre el contenido de COS almacenado en policultivo comercial bajo sombra y monocultivo bajo sombra, sus medias resultaron prácticamente iguales. Estos usos del suelo presentaron el mayor número de sitios de muestreo, por lo que son representativos de la zona de estudio. El modelo propuesto explicó el 23.59% de la variabilidad en el contenido de COS en los sitios de medición. Las variables independientes con influencia mayor respecto a la variación del COS en los sitios medidos fueron el almacén de C de la capa de hojarasca y la altitud, que resultaron estadísticamente significativas. El porcentaje de cobertura de vegetación arbórea, la sombra en el caso de los sistemas de producción de café, no resultó ser estadísticamente significativa.

CAPÍTULO II. CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN ECOSISTEMAS FORESTALES Y SISTEMAS AGROFORESTALES.

2.1 RESUMEN

Los bosques del mundo son importantes reservorios de C; pero su capacidad de almacenamiento se está perdiendo debido a procesos de deforestación, degradación de los ecosistemas forestales y cambios de uso del suelo causados por actividades antropogénicas. El almacén de COS es el reservorio más importante, representa en promedio más del 40% del total almacenado en los bosques. Así, el presente estudio aporta información sobre la capacidad de almacenamiento de COS de ecosistemas forestales comparados con la de otros usos de suelos en la región forestal de Texcoco, Estado de México, donde se levantaron muestras de suelo en 122 sitios con diversos USV. Los USV se clasificaron en tres fases: la fase 1 correspondió a la vegetación primaria o no perturbada, fase 2 a los USV modificados con diversa perturbación, y fase 3 a los USV producto de actividades antropogénicas, como la agricultura, bosque cultivado y plantaciones de árboles frutales. Se encontró la mayor reserva de COS en los sitios con menor perturbación antropogénica, los ecosistemas forestales presentaron hasta tres veces más COS en comparación con los usos de suelo de la fase 3; los bosques de coníferas resultaron ser los más grandes reservorios de COS, más eficientes que los ecosistemas agrícolas, y los ecosistemas de encino no presentaron grandes almacenamientos de COS.

2.2 ABSTRACT

The forests are important carbon stocks in the world, but its storage capacity is being lost due to deforestation, degradation, and land-use change caused by anthropogenic activities in forest ecosystems. The soil organic carbon store (SOC) is the most important reservoir, representing more than 40% of the total stored in forests. Thus, the present study provides information on the SOC storage capacity of forest ecosystems compared to that of other land uses in the forest region of Texcoco, State of Mexico. Vegetation was classified in phases as: phase 1 to primary or undisturbed land and vegetation uses (USV), phase 2 to modified USV with various disturbances, and phase 3 to USV product of anthropogenic activities such as agriculture, forest plantations and fruit trees. The largest SOC reserve was found in the sites with the least anthropogenic disturbance, the forest ecosystems presented up to three times more SOC compared to the land uses of phase 3; coniferous forests turned out to be the largest SOC reservoirs and more efficient than agricultural ecosystems and oak ecosystems, which did not present large SOC storages.

2.3 INTRODUCCIÓN

Los bosques son terreno con una cubierta de copas de árboles de más del 10 % y una superficie de más de 0.5 ha, cuyos árboles deben poder alcanzar una altura mínima de 5 m en la madurez *in situ*; se sabe que hasta 2015 cubrían una superficie de 4.06 mil millones de hectáreas en el mundo, lo cual corresponde al 31% de la superficie terrestre total (FAO, 2020), representando el 92% de toda la biomasa terrestre a nivel mundial. Sin embargo, los bosques no se encuentran distribuidos de manera uniforme en la Tierra (Metsaranta et al. 2010). Los bosques brindan una serie de servicios ecosistémicos que contribuyen al bienestar social, destacando su papel fundamental en el ciclo global del C, absorbiendo alrededor del 33% de las emisiones antropogénicas de C (Forzieri et al. 2021). No obstante, la superficie forestal ha disminuido desde 1990 a un ritmo estimado en un rango de 0.13 a 3% (Shukla et al. 2019) anual. La FAO, (2010.) estima que de 1990 a 2020 se ha perdido una superficie forestal de 178 millones de ha. Las definiciones de bosque se hacen para satisfacer propósitos específicos, con base en puntos de vista, conceptos y prioridades, pero se debe distinguir entre árboles nativos y no nativos en los bosques, para verlos como ecosistemas naturales (Chazdon et al. 2016).

Los bosques almacenan grandes cantidades de C, incorporándolo por medio de la producción de biomasa (PPN) y de la incorporación de MOS (humificación), intercambiando CO₂ y oxígeno con la atmósfera a través de la fotosíntesis y respiración. Los bosques son el sumidero de C terrestre más grande, y almacenan más de la mitad del C en los ecosistemas terrestres, por lo que tienen influencia significativa en el ciclo global del C (Hui et al. 2015). Sin embargo, los cambios en el uso del suelo y la gestión insostenible de los recursos naturales son causas humanas directas de la degradación del suelo. Se reconoce a la agricultura como un sector dominante que impulsa la degradación, resultando en emisiones netas de GEI por la degradación de los ecosistemas forestales y el cambio de USV (Lal et al. 2018). Se estima que deteniendo la degradación y deforestación por actividades humanas se eliminarían de la atmósfera entre 100 y 130 Pg C para el año 2100 en los bosques en recuperación (Houghton y Nassikas, 2018). Lamentablemente el almacén global de C declinó de 1990 a 2020, disminuyendo de 668 a 662 Pg (FAO, 2015).

El 45% del C forestal se encuentra en la MO del suelo, el 44% se almacena en la biomasa viva (sobre y debajo del suelo) y el resto en madera muerta y hojarasca. Se estima que el suelo almacena 1500 Pg C en el primer metro de profundidad, más C que el contenido en la atmósfera (aproximadamente 800 Pg C) y la vegetación terrestre (500 Pg C) combinados. Los factores que determinan el potencial del suelo como sumidero son la profundidad, DAP, la textura, los tipos y combinaciones de arcillas presentes, el grado de humedad, y el volumen ocupado por fragmentos gruesos donde el COS no puede enlazarse fácilmente (Gardi et al. 2014). Además, la cantidad de COS presente en un lugar y tiempo determinado dependen de varios factores y procesos, siendo los más significativos el material parental, el uso del suelo, la vegetación, el clima, la topografía, el cambio de uso del suelo y la erosión ((Horwath, 2007 y Nave et al. 2019) .

El suelo puede ser un sumidero o fuente de CO₂ (además de CH₄ y N₂O) dependiendo de su manejo. Además, el cambio global puede alterar la cantidad de C que almacena el suelo de un bosque y cómo se distribuye a través de horizontes o depósitos funcionalmente distintos (Nave et al. 2019). Los suelos forestales generalmente se caracterizan por soportar árboles con raíces profundas, capas densas de hojarasca, reciclaje de MO y nutrientes, y una amplia variedad de organismos que habitan en el suelo, factores que influyen en su formación. Pueden representar una solución más estable y duradera para el secuestro de C en comparación con la biomasa aérea (Marek et al. 2020); sin embargo, la perturbación intensiva por deforestación y cambio de uso del suelo usualmente provocan la reducción de las tasas de acumulación de C. La conversión de ecosistemas naturales a sistemas agropecuarios agota la reserva de COS hasta en un 50–80 % (Lal, 2003).

El suelo se encuentra bajo un alto deterioro en México debido a la pérdida de los ecosistemas, por lo que un manejo forestal adecuado puede reducir el impacto negativo en el C del ecosistema y puede mejorar su captura. De acuerdo a los datos de la CONAFOR, (2012), el promedio de superficie deforestada en México durante 2001 a 2018 fue de 212,070 ha año⁻¹, siendo principales transiciones de tierras forestales a pastizal (con un pico en 2014, año con una magnitud de cambio de 260,941 ha) y a tierra agrícolas (con un pico en 2016, con una magnitud de cambio de 108,188 ha). Por otro lado, de acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto

Invernadero (GEI), la categoría Uso del Suelo, Cambio de Uso del Suelo y Silvicultura representa 4.6% del total estimado de liberación de GEI a la atmósfera, (INECC, 2018). Respecto al almacén de COS en México (Paz et al. 2020) estimaron que, a la profundidad de 0 a 30 cm, el contenido es de alrededor de 9 Pg C y, a la profundidad de 100 cm, alrededor de 15 Pg C.

Se ha demostrado que los horizontes profundos (>30 cm) contribuyen hasta un 20% a la captura de C a lo largo de 20 años. La MO observada en un suelo en un momento dado es el resultado de una compleja historia de herencia ligada al funcionamiento (y posible uso) de un suelo durante varios cientos (o incluso miles) de años.

El presente estudio evalúa el impacto de las actividades antropogénicas, que derivan en degradación de los ecosistemas forestales o en cambios de uso del suelo, en la disminución de COS, respecto a la capacidad mostrada en ecosistemas forestales.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1 Ubicación de la zona de estudio

El Estado de México, se sitúa entre los 19°25'y 20°20' de latitud norte y 98°30' y 100°30' longitud oeste, con una superficie de 21,461km². Colinda al norte con Querétaro e Hidalgo; al este con Puebla y Tlaxcala; al sur con Guerrero, Morelos y la Ciudad de México; al oeste con Michoacán (INEGI, 2014). La región III Texcoco es una de las ocho regiones en las que está dividido el Estado de México, de acuerdo a La Protectora de Bosques del Estado de México (PROBOSQUE), abarca los municipios de Coacalco, Tepetlaoxtoc de Hidalgo, Texcoco, Chicoloapan de Juárez, Ixtapaluca, Chalco de Díaz Covarrubias, Tlalmanalco, Tenango del Aire, Ayapango, Amecameca, Tepetlixpa, Ozumba de Alzate, Ecatzingo de Hidalgo y Atlautla. (Figura 7).

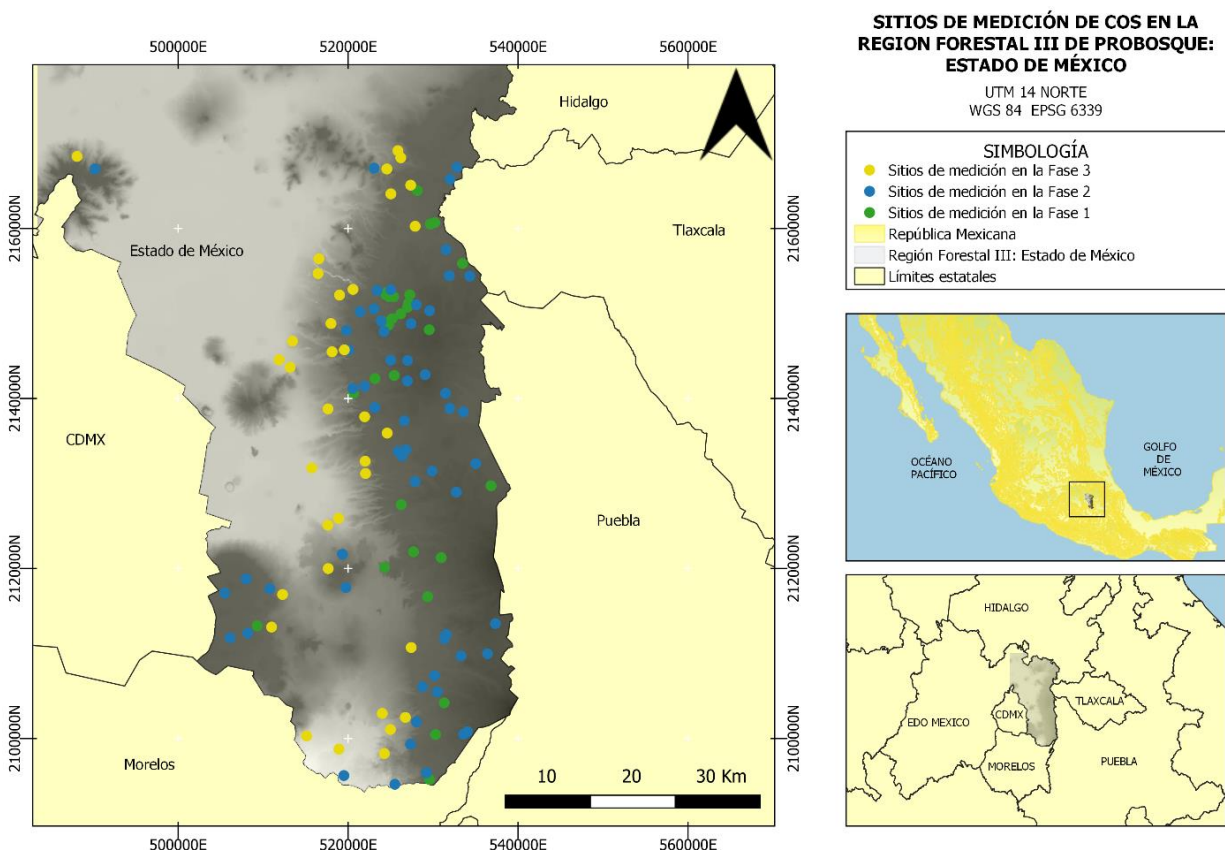


Figura 7. Localización del área de estudio.

Los puntos en verde representan los sitios de medición en la fase 1, en azul, la fase 2 y en amarillo, la fase 3.

2.4.2. Tipos de usos del suelo y vegetación

Se empleó el sistema de clasificación de USV del INEGI (escala 1:250,000) (INEGI, 2014) para definir los tipos de USV en el presente trabajo. Este sistema de clasificación abarca la totalidad del territorio nacional, es jerárquico y está constituido por información ecológica, florística y fisonómica; información agrícola, pecuaria y forestal e información complementaria CONAFOR, (2020). Además, se obtuvo la frecuencia relativa de cada USV para contar con un panorama general de la vegetación del área de estudio. En el Cuadro 8 se muestran los USV considerados en el presente estudio y sus principales características.

Se clasificó la vegetación por su grado de perturbación debido a causas naturales o antropogénicas. En la fase 1 se ubicó a la vegetación primaria o no perturbada, en la fase 2 la vegetación secundaria, aquella que debido a perturbaciones ha sido modificada y ha comenzado a presentar el proceso de sucesión (arbórea, arbustiva o herbácea) y en la fase 3, la vegetación desarrollada producto de la actividad humana, como la agricultura, el pastizal cultivado y las plantaciones (INEGI, 2009).

Cuadro 8. Descripción de los usos de suelo y vegetación del área de estudio

Clave	USV	Descripción
BB	Bosque de cedro	Se desarrollan en climas templados, semifríos y húmedos, <i>Cupressus lusitanica</i> .
BQ	Bosque de encino	Son comunidades vegetales constituidas por el género <i>Quercus spp</i> , se encuentran desde el nivel del mar hasta los 2,800 m.
BQP	Bosque de encino- pino	Se desarrolla en climas templados, semifríos, semicálidos, cálidos húmedos y subhúmedos; estas comunidades están conformadas por <i>Quercus spp</i> , <i>Pinus spp</i> .
BA	Bosque de oyamel	Se caracteriza por la presencia de <i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus spp</i> , <i>Quercus spp</i> . y <i>Alnus jorullensis</i> .
BP	Bosque de pino	Se caracteriza por su afinidad hacia los climas templados a fríos y semihúmedos. Las especies más comunes son <i>Pinus leiophylla</i> , <i>Pinus hartwegii</i> .
MC	Matorral crasicaule	Se localiza en las zonas semiáridas. Se desarrollan sobre suelos someros de laderas de cerros de naturaleza volcánica. La principal especie encontrada fue <i>Nolina parviflora</i> .
MJ	Matorral de coníferas	Comunidad arbustiva o subarbórea. Se localiza en montañas, en clima templados y fríos subhúmedos; formadas por <i>Pinus pseudostrobus</i> y <i>Juniperus deppeana</i> .
BPQ	Bosque de pino-encino	Se distribuyen en climas templados, semifríos, semicálidos y cálidos húmedos. Estas comunidades están conformadas por <i>Pinus spp</i> y <i>Quercus spp</i> .
MDM	Matorral desértico micrófilo	La distribución de este matorral se extiende a las zonas más secas de México. <i>Larrea tridentata</i> y <i>Flourensia cernua</i> , constituyen del 90 a 100% de la vegetación; aparecen arbustos con especies de <i>Prosopis</i> , <i>Cercidium</i> , <i>Olneya</i> , <i>Condalia</i> , <i>Lycium</i> , <i>Opuntia</i> , <i>Fouquieria</i> , <i>Hymenoclea</i> , <i>Acacia</i> , <i>Chilopsis</i> , etc.
RA	Agricultura de riego	Utiliza agua suplementaria para el desarrollo de los cultivos durante el ciclo agrícola.
TA	Agricultura de temporal	El ciclo vegetativo de los cultivos depende del agua de lluvia, está en función de la cantidad de precipitación y de la capacidad del suelo para retener el agua.
BC	Bosque cultivado	Se establecen mediante la plantación y manejo de especies arboladas con un fin productivo. Ejemplos: <i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>Pinus leiophylla</i> , <i>Eucalyptus spp</i> y <i>Cupressus lusitanica</i> .
PI	Pastizal inducido	Poblaciones vegetales introducidas por el hombre por diferentes causas (deforestación).
RP	Plantaciones de frutales	Tipo de plantación de especies arbóreas cuyo ciclo vegetativo es mayor a diez años y que son plantados en el sustrato. Se dedican al aprovechamiento de frutos.

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI, (2017) y datos de campo.

2.4.3 Metodología

La metodología empleada se tomó del manual de campo del Inventario Forestal Estatal Cuantitativo) y de la “Propuesta para el establecimiento de un Sistema Nacional de Monitoreo de la dinámica del carbono en ecosistemas forestales de México” (PMC, 2016). En relación a los datos sobre el contenido del COS se realizó un muestreo cuantitativo y sistemático como se describe a continuación:

Trabajo de campo

En cada sitio se colectaron muestras de suelo empleando una barrena de tubo de 2” de diámetro interno, o de gusano en el caso de suelos muy duros, en el cual se obtuvieron los valores cuantitativos de DAP y pedregosidad. Para obtener la DAP, primero se limpió la superficie del suelo de la fracción vegetal que no estaba enraizada al suelo (30 cm x 30 cm), utilizando un cilindro recto de acero de volumen conocido. Todo el material extraído se colocó en una bolsa, se pesó en el sitio con la balanza (peso fresco), se etiquetó y se llevó al laboratorio, en donde se secó por 48 para obtener el peso de suelo seco.

Trabajo de laboratorio

El porcentaje de la fracción gruesa (FG) se obtuvo secando, moliendo y tamizando el suelo de las muestras en una malla #10, con abertura de 2 mm, para conseguir el peso de ambas fracciones (gruesa y fina) y calcular su porcentaje. Posteriormente se obtuvo una submuestra de 5 gr de la fracción fina, la cual se tamizó en malla #100 y se colocó en un sobre de papel con su respectivo código de identificación. El porcentaje de C de cada muestra se obtuvo directamente utilizando el equipo analizador automático de carbono *Shimadzu 5050A* del Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental del Colegio de Postgraduados (COLPOS), mediante el siguiente procedimiento: La submuestra de suelo (5 gr) se secó a 110°C durante al menos 6 horas, con la finalidad de eliminar completamente la humedad. Para analizar en el equipo TOC se pesó suelo de entre 100 a 400 mg (dependiendo del color de la muestra) en crisoles de porcelana, específicos para el equipo *Shimadzu 5050A*. El crisol se colocó dentro del equipo registrando el peso y se expuso a 900°C en horno durante cinco minutos; el equipo

incineró la muestra y calcinó todo el material, liberando CO₂. Este último pasa a través de un sensor que calculó y reportó el porcentaje de C contenido en la muestra. En este trabajo se calculó el contenido de COS a una profundidad máxima de 30 ± 10 cm, aunque en algunos sitios se encontraron suelos someros en los que la profundidad de muestreo fue menor. Se estimó utilizando la Ecuación (1), de acuerdo a la guía de buenas prácticas del IPCC (IPCC, 2006).

$$COS = D \cdot AP \cdot P \cdot 10000 \cdot COSp \cdot (1 - FG100) \quad \dots (1)$$

Dónde:

COS = Carbono Orgánico en el Suelo (Mg ha⁻¹)

DAP = Densidad aparente del suelo (Mg m⁻³)

P = Profundidad del suelo (m)

FG = Fragmentos gruesos en el suelo, > 2mm (%)

COSp = Contenido de Carbono orgánico, en %

10000 = Factor de escala, m² ha⁻¹

2.4.4 Análisis estadístico

Los resultados del análisis de comparación de medias muestran que entre la fase 1 y 2 no hay diferencia, al ubicarse en el mismo grupo, pero ambas mostraron diferencias estadísticamente significativas respecto a la fase 3, en la que el contenido de COS resultó considerablemente menor, como se aprecia en la Figura 8, donde se muestra que el contenido de COS disminuye considerablemente en los USV en los que existe una mayor intervención antropogénica. Así, las reservas del COS disminuyeron en el orden: fase 1 > fase 2 > fase 3. Lo anterior probablemente se deba a una mayor disponibilidad de fuentes de C, que posteriormente se transfieren al almacén del suelo, debido a la mayor PPN de los ecosistemas, en particular los bosques templados y subtropicales son de los ecosistemas más productivos de la Tierra (DellaSala, 2018), por lo que el aporte de detritus es mayor (hojarasca y madera muerta) de los ecosistemas nativos respecto a sistemas manejados, como la agricultura y pastoreo (Paustian et al. 2019); además del aporte por la muerte y los exudados de las raíces (Marek et al. 2020), aunque la tasa de

descomposición para convertir estas fuentes de C a COS está controlada por factores climáticos.

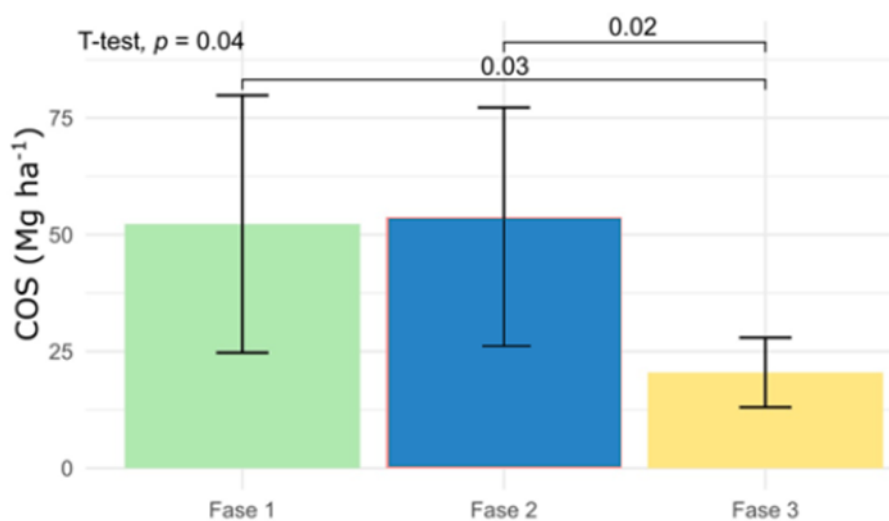


Figura 8. Densidad de COS por grado de perturbación natural o antropogénica.

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La distribución de los matorrales se extiende a las zonas más secas de México, cubre del 3 al 20 % de la superficie (INEGI, 2017), en áreas de escaso relieve y contienen niveles bajos de COS (Briones et al. 2020), al contrario de los bosques templados que almacenan grandes cantidades de C (INEGI, 2017), como fue el caso en este estudio, en el que el matorral de coníferas contuvo la menor cantidad de COS de la vegetación primaria. En la Figura 8 se muestra el COS capturado en cada USV.

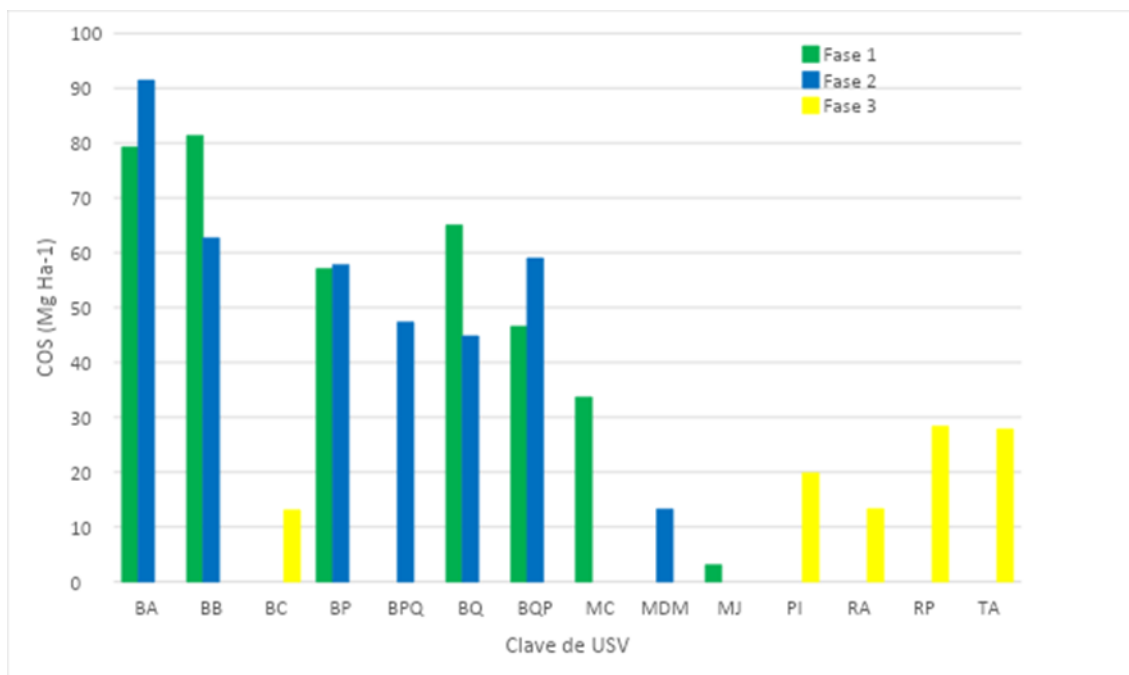


Figura 9. Densidad de COS en las tres fases por tipo de vegetación.

La superficie con bosque primario representa 11.40% de cobertura del total del área de estudio, el bosque secundario el 17.64%, la agricultura de riego, 29.82%, la agricultura de temporal, 30.13%, el pastizal, 3.94% y el bosque cultivado, el 0.11%, lo que refleja el grado de deforestación en la cuenca, como se puede observar en la Figura 10.

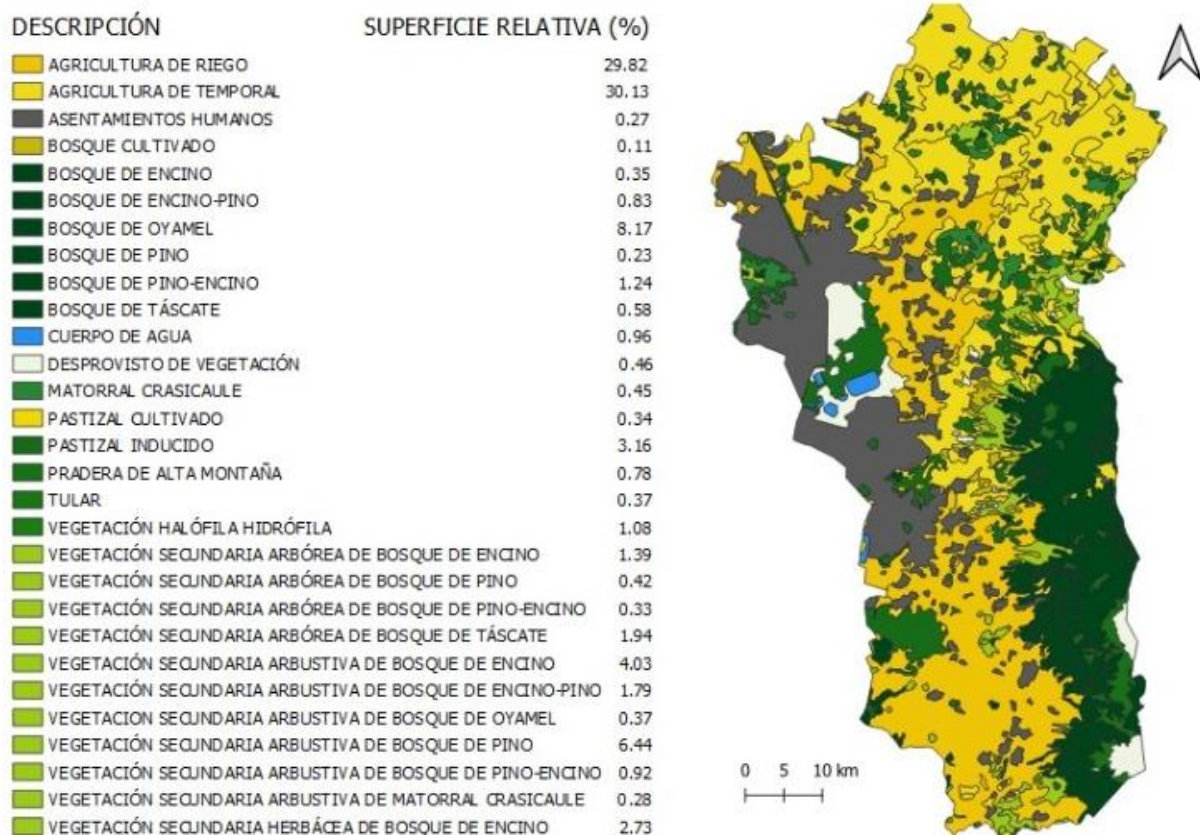


Figura 10. Sistema de clasificación de USV, escala 1:250,000. (INEGI, 2014)

En la Figura 11 se muestra de manera esquemática las condiciones de la vegetación en una secuencia frecuente de USV en el área de estudio, así como el porcentaje de cobertura de cada una de ellas en relación a la superficie total. Asimismo, de acuerdo a lo observado en las Figuras 7 y 10, la degradación de la vegetación se relaciona con la altitud y cercanía a los asentamientos humanos, las áreas de vegetación primaria (fase 1) se encuentran fundamentalmente en zonas de mayor altitud y a mayor distancia de los asentamientos humanos.

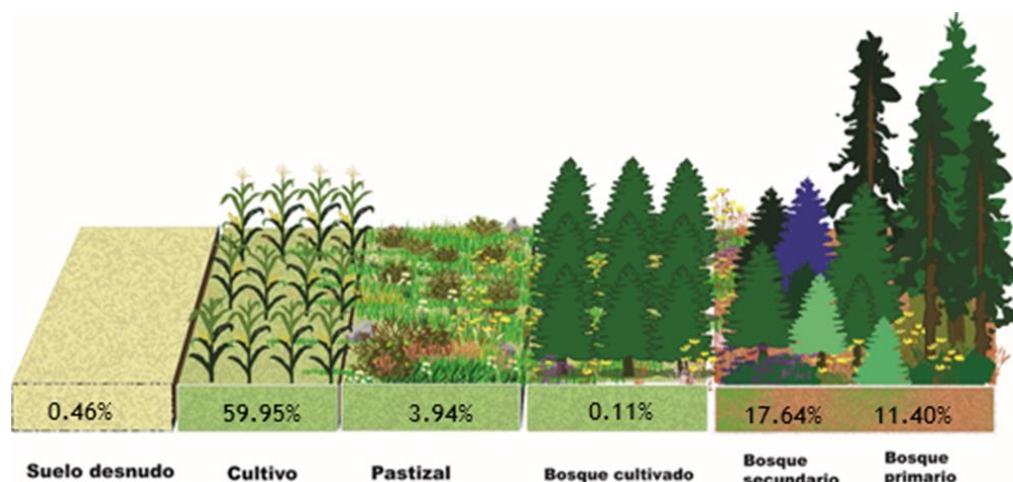


Figura 11. Representación de la vegetación por su grado de perturbación
Elaboró: Andrés Flores Miguel

La vegetación nativa reflejó un mayor almacenamiento de COS principalmente por los bosques de oyamel, cedro, pino y encino. Estos alcanzaron contenidos de COS de 60 a 90 Mg C ha⁻¹, los cuales se observaron predominantes en la fase 2. Esta condición es frecuente en los bosques nativos, ya que la cantidad de hojarasca y las raíces promueven la acumulación de MO, además coincide con los resultados reportados por Cruz *et al.* (2011), quienes obtuvieron mayores contenidos de COS en bosques de *Abies religiosa* (92 Mg C ha⁻¹) respecto a bosques de pino, aunque con una amplia variación en función de la especie de pino (21 a 180 Mg C ha⁻¹), incluso en aquellos que tuvieron estratos herbáceos y arbustivos (fase 2) en áreas naturales protegidas.

En la fase 2, el bosque de oyamel almacenó en promedio 91.4 Mg C ha⁻¹, el bosque de cedro 62.7 Mg C ha⁻¹, siendo el USV que mayor cantidad de COS contuvo. En contraste, el matorral desértico xerófilo fue el que menos COS almacenó, con 13.2 Mg C ha⁻¹. El bosque de oyamel, el bosque de pino, el bosque de pino-encino, el bosque de encino-pino y el matorral desértico micrófilo tuvieron mayor contenido de COS en fase 2 respecto a fase 1.

En la fase 3, en orden de mayor a menor, las plantaciones de frutales contuvieron en promedio mayor COS que la agricultura de temporal, el pastizal inducido y la agricultura de riego. En esta fase el bosque cultivado, que fueron monoespecíficos, contuvo la

menor cantidad de COS, en promedio $13.1 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Los bosques naturales almacenaron notablemente más C que los bosques cultivados, lo que se debe a las estructuras complejas de los rodales y la acumulación de C debajo del suelo y en el suelo del bosque en los primeros, lo que puede tardar siglos en reflejarse (Waring et al. 2020). En la Figura 12 se presenta el porcentaje de cobertura y el COS almacenado en cada USV, natural o antropogénica.

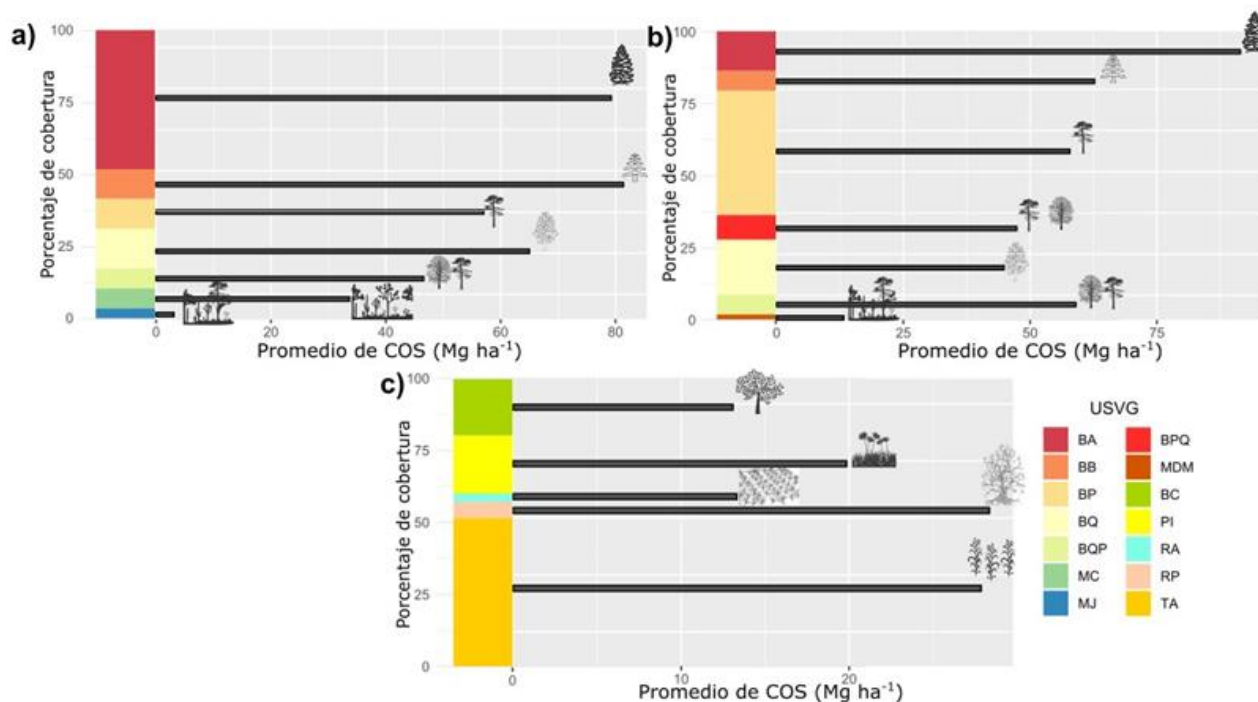


Figura 12. a) Representación de cobertura de cada USV en la fase 1 y su respectivo promedio de COS. BA: Bosque de oyamel, BQ: Bosque de Encino, BB: Bosque de cedro, BP: Bosque de pino, BQP: Bosque de Encino-pino, MC: Matorral crasicaule, MJ: Matorral de coníferas. b) Representación de cobertura de cada USV en la fase 1 y su promedio de COS. BA: Bosque de oyamel, BB: Bosque de cedro, BP: Bosque de pino, BPQ: Bosque de pino-encino, BQ: Bosque de encino, BQP: Bosque de encino-pino, MDM: Matorral desértico micrófilo. c) Representación de cobertura de cada USV en la fase 1 y su promedio de COS. BC: Bosque cultivado, PI: Pastizal inducido, RA: Agricultura de riego, RP: Plantación de frutales, TA: Agricultura de temporal.

El bosque de oyamel cubre casi el 50% de la superficie que corresponde a la fase 1, lo que representa un importante almacén de COS en el área de estudio, ya que captura casi 80 Mg C ha^{-1} ; aunque el bosque de cedro captura más COS por unidad de superficie, no representa ni el 25% de cobertura. Además, poco más del 25% está plantado con

bosque de encino, que almacena más de 60 Mg C ha⁻¹, por lo que el bosque de cedro representa un mayor volumen de COS almacenado. La vegetación que más COS captura en la fase 2, es el bosque de oyamel, sin embargo, apenas un 25% del total del área de estudio está plantada con este tipo de vegetación, le sigue el bosque de encino y bosque de encino-pino, que representa más del 10% de plantación cada uno, sin embargo, casi el 40% de la superficie está plantada con bosque de pino, quien apenas logra capturar 60 Mg C ha⁻¹.

Las plantaciones de frutales capturan casi 30 Mg C ha⁻¹, al igual que la agricultura de temporal, sin embargo, esta última ocupa más del 50% de la superficie en la fase 3. El cambio de uso de la tierra de ecosistema nativo a ecosistema cultivado provoca pérdidas de C en el suelo (Lal et al. 2018). La gestión de la tierra que ejerce la menor perturbación del suelo contribuye a una mayor acumulación de COS; detener la conversión del uso de la tierra sería un mecanismo efectivo para reducir las pérdidas de C del suelo, ya que históricamente, los suelos han perdido entre 40 y 90 Pg de C a nivel mundial a través del cultivo y la alteración, con tasas actuales de pérdida de C debido al cambio de uso de la tierra de alrededor de 1.6 ± 0.8 Pg C y⁻¹ (Smith, 2008). Adicionalmente, durante el muestreo de campo, los suelos que corresponden a usos de suelo de la fase 3 se encontraron, en general, más alterados por el laboreo y, en algunos casos, uso de fertilizantes químicos respecto a los USV agrupados en la fase 2; lo que coincide con los resultados encontrados por otros autores (Leyva et al. 2021 y Sha et al. 2022)

2.6 CONCLUSIONES

Se presentó información sobre la capacidad de almacenamiento de COS de ecosistemas forestales y se comparó con la de otros usos de suelos en la región forestal de Texcoco, Estado de México. y se encontró que el promedio del contenido de COS en sistemas agrícolas fue menor que el contenido de COS en sistemas forestales. La mayor reserva de COS se identificó en los sitios con menor perturbación antropogénica, siendo notablemente mayores en las fases 1 y 2 respecto a la fase 3, lo que implica que cantidades importantes de C se liberan a la atmósfera cuando ocurren cambios de uso del suelo de ecosistemas nativos a usos de suelo para actividades antropogénicas.

Los ecosistemas forestales presentaron los mayores almacenes de COS, incluso cuando se encontraron en fases de sucesión, siendo notablemente mayores (hasta tres veces más) al contenido encontrado en este almacén en ecosistemas de matorral, y todos los usos de suelo de la fase 3, incluyendo el bosque cultivado. Los bosques de coníferas resultaron ser los más grandes reservorios de COS y más eficientes que los ecosistemas agrícolas. Los ecosistemas de encino no presentaron almacenamientos tan grandes como se esperaba de la vegetación arbórea.

CONCLUSIONES GENERALES

Se determinó el potencial de captura de COS en los sistemas agroforestales de café y ecosistemas forestales. Respecto a los primeros, se encontró que el COS almacenado en los sistemas de producción de café resultó igual o superior a algunos tipos de vegetación natural. El tipo de cafetal rústico no tuvo diferencias significativas respecto al COS almacenado en los tipos de vegetación natural más productivos de la zona de estudio (selva mediana perennifolia y selva mediana subperennifolia), incluso, presentan una media superior los primeros. Los contenidos de COS almacenado en policultivo comercial bajo sombra, monocultivo bajo sombra y bosque mesófilo de montaña resultaron ser similares, de acuerdo a la comparación de medias con un nivel de significancia del 5%. Todos los sistemas de producción de café bajo sombra almacenaron mayor cantidad de COS en relación a la vegetación natural del bosque de encino y el bosque de pino-encino. En el caso de los ecosistemas forestales, se identificó que la mayor reserva de COS ocurrió en los sitios con menor perturbación antropogénica, por lo que los ecosistemas forestales presentaron los mayores almacenes de COS, incluso cuando se encontraron en fases de sucesión; los bosques de coníferas resultaron ser los más grandes reservorios de COS y más eficientes que los ecosistemas agrícolas; lo que implica que cantidades importantes de C se liberan a la atmósfera cuando ocurren cambios de uso del suelo de ecosistemas nativos a usos de suelo para actividades antropogénicas.

LITERATURA CITADA

- Abbas, F., Hammad, H. M., Ishaq, W., Farooque, A. A., Bakhat, H. F., Zia, Z., Fahad, S., Farhad, W., & Cerdà, A. (2020). A review of soil carbon dynamics resulting from agricultural practices. *Journal of Environmental Management*, 268, 110319. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.110319>
- Aguaron, E., & McPherson, E. G. (2012). Comparison of methods for estimating carbondioxide storage by sacramento's urban forest. *Carbon Sequestration in Urban Ecosystems*, 44-71. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2366-5_3/COVER
- Ahmad Dar, J., & Somaiah, S. (2015). Altitudinal variation of soil organic carbon stocks in temperate forests of Kashmir Himalayas, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(2), 1-15. <https://doi.org/10.1007/S10661-014-4204-9/TABLES/4>
- Andreu, M., Friedman, M., & Northrop, R. (2009). Servicios ambientales proporcionados por el bosque urbano de Tampa. *EDIS*. <https://journals.flvc.org/edis/article/download/117791/115812>
- Avilés-Hernández, V., Velázquez-Martínez, A., Angeles-Pérez, G., Etchevers-Barra, J., de Los Santos-Posadas, H., & Llanderal, T. (s. f.). *DE UNA TOPOSECUENCIA VARIATION IN SOIL CARBON STOCKS IN A TOPOSEQUENCE*.
- Bartlett, A. G. (2021). Exploring transformational outcomes from donor investments in agroforestry research for development. *Agroforestry Systems*, 95(7), 1383-1394. <https://doi.org/10.1007/S10457-020-00516-3/FIGURES/3>
- Batjes, N. H., Ribeiro, E., van Oostrum, A., Leenaars, J., Hengl, T., & Mendes De Jesus, J. (2017). WoSIS: Providing standardised soil profile data for the world. *Earth System Science Data*, 9(1), 1-14. <https://doi.org/10.5194/ESSD-9-1-2017>
- Bhandari, S., & Bam, S. (2014). Comparatives Study of Soil Organic Carbon (SOC) under Forest, Cultivated and Barren Land: A Case of Chovar Village, Kathmandu. *Nepal Journal of Science and Technology*, 14(2), 103-108. <https://doi.org/10.3126/njst.v14i2.10422>
- Bhattacharyya, R., Kundu, S., Pandey, S. C., Singh, K. P., & Gupta, H. S. (2008). Tillage and irrigation effects on crop yields and soil properties under the rice–wheat system in the Indian Himalayas. *Agricultural Water Management*, 95(9), 993-1002. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2008.03.007>
- Briones, O., Flores-Martínez, A., Castellanos, A. E., Perroni, Y., & Hernández-Guerrero, A. (2020). Población, servicios ecosistémicos, ciclo del carbono y políticas públicas en las zonas secas de México. *Elementos Para Políticas Públicas*, 4(2), 79-98. <http://www.elementospolipub.org/ojs/index.php/epp/article/view/36>
- Bunn, C., Läderach, P., Ovalle Rivera, O., & Kirschke, D. (2015). A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. *Climatic Change*, 129(1-2), 89-101. <https://doi.org/10.1007/S10584-014-1306-X/FIGURES/5>

- Burbano Orjuela, H., & Burbano Orjuela, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 82-96. <https://doi.org/10.22267/RCIA.183501.85>
- Canfield, D. E., Glazer, A. N., & Falkowski, P. G. (2010). The evolution and future of earth's nitrogen cycle. *Science*, 330(6001), 192-196. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1186120/ASSET/F7358C13-AACA-4C7C-8BEF-45AF7341F415/ASSETS/GRAPHIC/330_192_F4.JPEG
- CEDRSSA. (s. f.). Recuperado 17 de octubre de 2022, a partir de <http://www.cedrssa.gob.mx/>
- Cerda, R., Allinne, C., Gary, C., Tixier, P., Harvey, C. A., Krolczyk, L., Mathiot, C., Clément, E., Aubertot, J. N., & Avelino, J. (2017). Effects of shade, altitude and management on multiple ecosystem services in coffee agroecosystems. *European Journal of Agronomy*, 82, 308-319. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2016.09.019>
- Cerda, R., Avelino, J., Harvey, C. A., Gary, C., Tixier, P., & Allinne, C. (2020). Coffee agroforestry systems capable of reducing disease-induced yield and economic losses while providing multiple ecosystem services. *Crop Protection*, 134, 105149. <https://doi.org/10.1016/J.CROPRO.2020.105149>
- Chain-Guadarrama, A., Virginio Filho, E. de M., & Martínez-Salinas, A. (2021). *Conservación de aves, abejas y los servicios ecosistémicos que estas prestan a la producción de café: Guía de buenas prácticas*. 45. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/11363>
- Chapman, M., Walker, W. S., Cook-Patton, S. C., Ellis, P. W., Farina, M., Griscom, B. W., & Baccini, A. (2020). Large climate mitigation potential from adding trees to agricultural lands. *Global Change Biology*, 26(8), 4357-4365. <https://doi.org/10.1111/GCB.15121>
- Chazdon, R. L., Brancalion, P. H. S., Laestadius, L., Bennett-Curry, A., Buckingham, K., Kumar, C., Moll-Rocek, J., Vieira, I. C. G., & Wilson, S. J. (2016). When is a forest a forest? Forest concepts and definitions in the era of forest and landscape restoration. *Ambio*, 45(5), 538-550. <https://doi.org/10.1007/S13280-016-0772-Y/FIGURES/3>
- Ciais, P., Gasser, T., Paris, J. D., Caldeira, K., Raupach, M. R., Canadell, J. G., Patwardhan, A., Friedlingstein, P., Piao, S. L., & Gitz, V. (2013). Attributing the increase in atmospheric CO₂ to emitters and absorbers. *Nature Climate Change* 2013 3:10, 3(10), 926-930. <https://doi.org/10.1038/nclimate1942>
- Climate Change: A Very Short Introduction* - Mark Maslin - Google Libros. (s. f.). Recuperado 16 de octubre de 2022, a partir de https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=hmTDBAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Climate+Change:+A+Very+Short+Introduction.+Third+Edition&ots=bjMIG1LqiU&sig=KXpjUv6iuoFxpodR_RyM148slp4#v=onepage&q=Climate%20Change%3A%20A%20Very%20Short%20Introduction.%20Third%20Edition&f=false

- Coe, M. T., Macedo, M., Silverio, D. v., Panday, P. K., Brando, P. M., Coe, M. T., Macedo, M., Silverio, D. v., Panday, P. K., & Brando, P. M. (2014). Hydrological Consequences of Deforestation and Forest Degradation in the Amazon Agricultural Frontier. *AGUFM*, 2014, GC22F-03. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014AGUFMGC22F..03C/abstract>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas | Gobierno | *gob.mx*. (s. f.). Recuperado 17 de octubre de 2022, a partir de <https://www.gob.mx/conanpl>
- Comisión Nacional Forestal | Gobierno | *gob.mx*. (s. f.). Recuperado 17 de octubre de 2022, a partir de <https://www.gob.mx/conafor>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad | Gobierno | *gob.mx*. (s. f.). Recuperado 17 de octubre de 2022, a partir de <https://www.gob.mx/conabio>
- Contenidos de carbono orgánico de suelos someros en pinares y abetales de áreas protegidas de México. (s. f.). Recuperado 16 de octubre de 2022, a partir de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952011000800001
- Cortés-Sánchez, B. G., Ángeles-Pérez, G., Santos-Posadas, H. M. D. los, Ramírez-Maldonado, H., Cortés-Sánchez, B. G., Ángeles-Pérez, G., Santos-Posadas, H. M. D. los, & Ramírez-Maldonado, H. (2019). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa en especies de encino en Guanajuato, México. *Madera y Bosques*, 25(2). <https://doi.org/10.21829/MYB.2019.2521799>
- Cortina-Villar, S., Plascencia-Vargas, H., Vaca, R., Schroth, G., Zepeda, Y., Soto-Pinto, L., & Nahed-Toral, J. (2012). Resolving the conflict between ecosystem protection and land use in protected areas of the sierra madre de chiapas, Mexico. *Environmental Management*, 49(3), 649-662. <https://doi.org/10.1007/S00267-011-9799-9/FIGURES/6>
- Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F. N., & Leip, A. (2021). Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food* 2:3, 2(3), 198-209. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>
- D., W. (1997). Linkages between soil biota, plant litter quality and decomposition. *Driven by Nature*, 107-125. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1572261550009448704>
- Dahlgren, R. A., Boettinger, J. L., Huntington, G. L., & Amundson, R. G. (1997). Soil development along an elevational transect in the western Sierra Nevada, California. *Geoderma*, 78(3-4), 207-236. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00034-7)
- de Jong, B. H. J., Cairns, M. A., & Haggerty, P. K. (s. f.). *Land-Use Change and Carbon Flux Between 1970s and 1990s in Central Highlands of Chiapas, Mexico*.

DellaSala, D. A. (2018). OBSOLETE: The Carbon Cycle and Global Change: Too Much of a Good Thing. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.05874-7>

Ecology and Management of Forest Soils - Dan Binkley, Richard F. Fisher - Google Books. (s. f.). Recuperado 16 de octubre de 2022, a partir de https://books.google.com.mx/books?hl=en&lr=&id=AiCMDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&ots=INuCV2IBMk&sig=6ZBlzPFv6hzwcq11iRoHtXuRkYU&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México. (s. f.). Recuperado 16 de octubre de 2022, a partir de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792017000100073

Eswaran, H., Berg, E. van den, & Reich, P. (1993). Organic Carbon in Soils of the World. *Soil Science Society of America Journal*, 57(1), 192-194. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1993.03615995005700010034X>

FAOSTAT. (s. f.). Recuperado 17 de octubre de 2022, a partir de <https://www.fao.org/faostat/es/#home>

Forzieri, G., Girardello, M., Ceccherini, G., Spinoni, J., Feyen, L., Hartmann, H., Beck, P. S. A., Camps-Valls, G., Chirici, G., Mauri, A., & Cescatti, A. (2021). Emergent vulnerability to climate-driven disturbances in European forests. *Nature Communications* 2021 12:1, 12(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21399-7>

Gamboa, A. M., & Galicia, L. (2011). Differential influence of land use/cover change on topsoil carbon and microbial activity in low-latitude temperate forests. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 142(3-4), 280-290. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2011.05.025>

Gardi, C., Florczyk, A. J., & Scalenghe, R. (2021). Outlook from the soil perspective of urban expansion and food security. *Heliyon*, 7(1). <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2020.E05860>

Gardi, C., Panagos, P., van Liedekerke, M., Bosco, C., & de Brogniez, D. (2014). Land take and food security: assessment of land take on the agricultural production in Europe. *Http://Dx.Doi.Org/10.1080/09640568.2014.899490*, 58(5), 898-912. <https://doi.org/10.1080/09640568.2014.899490>

Gardi: Ocupación de tierras y seguridad alimentaria: evaluación de... - Google Académico. (s. f.). Recuperado 16 de octubre de 2022, a partir de https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Land%20take%20and%20food%20security%3A%20assessment%20of%20land%20take%20on%20the%20agricultural%20production%20in%20Europe&publication_year=2014&author=C.%20Gardi&author=P.%20Panagos&author=M.%20Van%20Liedekerke

- Geissen, V., Sánchez-Hernández, R., Kampichler, C., Ramos-Reyes, R., Sepulveda-Lozada, A., Ochoa-Goana, S., de Jong, B. H. J., Huerta-Lwanga, E., & Hernández-Daumas, S. (2009). Effects of land-use change on some properties of tropical soils — An example from Southeast Mexico. *Geoderma*, 151(3-4), 87-97. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2009.03.011>
- Gergel, S. E., Powell, B., Baudron, F., Wood, S. L. R., Rhemtulla, J. M., Kennedy, G., Rasmussen, L. v., Ickowitz, A., Fagan, M. E., Smithwick, E. A. H., Ranieri, J., Wood, S. A., Groot, J. C. J., & Sunderland, T. C. H. (2020). Conceptual Links between Landscape Diversity and Diet Diversity: A Roadmap for Transdisciplinary Research. *BioScience*, 70(7), 563-575. <https://doi.org/10.1093/BIOSCI/BIAA048>
- González-Chávez, M. del C. A., Aitkenhead-Peterson, J. A., Gentry, T. J., Zuberer, D., Hons, F., & Loeppert, R. (2010). Soil microbial community, C, N, and P responses to long-term tillage and crop rotation. *Soil and Tillage Research*, 106(2), 285-293. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2009.11.008>
- Gough, L., Ramsey, E. A., Johnson, D. R., Gough, L., Ramsey, E. A., & Johnson, D. R. (2007). Plant–herbivore interactions in Alaskan arctic tundra change with soil nutrient availability. *Oikos*, 116(3), 407-418. <https://doi.org/10.1111/J.0030-1299.2007.15449.X>
- Gregorich, E. G., Turchenek, L. W., Carter, M. R., Angers, D. A., Raton, B., New, L., & Washington, Y. (2001). Soil and Environmental Science Dictionary. *Soil and Environmental Science Dictionary*. <https://doi.org/10.1201/9780849331152>
- Hergoualc'h, K., Blanchart, E., Skiba, U., Hénault, C., & Harmand, J. M. (2012). Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 148, 102-110. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2011.11.018>
- Hernández-Martínez, G. (s. f.). *Clasificación agroecológica*.
- Hoang, N. T., & Kanemoto, K. (2021). Mapping the deforestation footprint of nations reveals growing threat to tropical forests. *Nature Ecology & Evolution* 2021 5:6, 5(6), 845-853. <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01417-z>
- Horwath, W. R. (2007). CARBON CYCLING AND FORMATION OF SOIL ORGANIC MATTER. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, 303-339. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-047514-1.50016-0>
- Houghton, R. A. (2007a). Balancing the Global Carbon Budget. <https://doi.org/10.1146/Annurev.Earth.35.031306.140057>, 35, 313-347. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.EARTH.35.031306.140057>
- Houghton, R. A. (2007b). Balancing the Global Carbon Budget. <https://doi.org/10.1146/Annurev.Earth.35.031306.140057>, 35, 313-347. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.EARTH.35.031306.140057>

- Houghton, R. A., & Nassikas, A. A. (2018). Negative emissions from stopping deforestation and forest degradation, globally. *Global Change Biology*, 24(1), 350-359. <https://doi.org/10.1111/GCB.13876>
- Hui, D., Deng, Q., & Tian, H. (s. f.). *Climate Change and Carbon Sequestration in Forest Ecosystems EaSM2-Wildfires and Regional Climate Variability-Mechanisms, Modeling, and Prediction View project Litter decomposition in terrestrial ecosystems View project*. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6431-0_13-2
- Inicio | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (s. f.). Recuperado 17 de octubre de 2022, a partir de <https://www.fao.org/home/es>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático | Gobierno | gob.mx. (s. f.-a). Recuperado 17 de octubre de 2022, a partir de <https://www.gob.mx/inecc>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático | Gobierno | gob.mx. (s. f.-b). Recuperado 17 de octubre de 2022, a partir de <https://www.gob.mx/inecc>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (s. f.). Recuperado 17 de octubre de 2022, a partir de <https://www.inegi.org.mx/>
- Introduction to Soil Science and Soil Resources. (s. f.). Recuperado 17 de octubre de 2022, a partir de www.yukonu.ca
- Islas-Espinoza, M., Reid, B. J., Wexler, M., & Bond, P. L. (2012). Soil Bacterial Consortia and Previous Exposure Enhance the Biodegradation of Sulfonamides from Pig Manure. *Microbial Ecology*, 64(1), 140-151. <https://doi.org/10.1007/S00248-012-0010-5/FIGURES/6>
- Jensen, J. L., Schjønning, P., Watts, C. W., Christensen, B. T., Peltre, C., & Munkholm, L. J. (2019). Relating soil C and organic matter fractions to soil structural stability. *Geoderma*, 337, 834-843. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2018.10.034>
- Jha, S., Bacon, C. M., Philpott, S. M., Méndez, V. E., Läderach, P., & Rice, R. A. (2014). Shade Coffee: Update on a Disappearing Refuge for Biodiversity. *BioScience*, 64(5), 416-428. <https://doi.org/10.1093/BIOSCI/BIU038>
- Kalbitz, K., Kaiser, K., Bargholz, J., & Dardenne, P. (2006). Lignin degradation controls the production of dissolved organic matter in decomposing foliar litter. *European Journal of Soil Science*, 57(4), 504-516. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2389.2006.00797.X>
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623-1627. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1097396/SUPPL_FILE/LAL.SOM.PDF
- Lal, R., Smith, P., Jungkunst, H. F., Mitsch, W. J., Lehmann, J., Ramachandran Nair, P. K., McBratney, A. B., de Moraes Sá, J. C., Schneider, J., Zinn, Y. L., Skorupa, A. L. A., Zhang, H. L., Minasny, B., Srinivasrao, C., & Ravindranath, N. H. (2018). The

- carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems. *Journal of Soil and Water Conservation*, 73(6), 145A-152A. <https://doi.org/10.2489/JSWC.73.6.145A>
- le Quéré, C., Andres, R. J., Boden, T., Conway, T., Houghton, R. A., House, J. I., Marland, G., Peters, G. P., van der Werf, G. R., Ahlström, A., Andrew, R. M., Bopp, L., Canadell, J. G., Ciais, P., Doney, S. C., Enright, C., Friedlingstein, P., Huntingford, C., Jain, A. K., ... Zeng, N. (2013). The global carbon budget 1959-2011. *Earth System Science Data*, 5(1), 165-185. <https://doi.org/10.5194/ESSD-5-165-2013>
- Leyva-Pablo, T., León-González, F. de, Etchevers-Barra, J. D., Cortés-Pérez, M., Santiago-García, W., Ponce Mendoza, A., Fuentes-Ponce, M. H., Leyva-Pablo, T., León-González, F. de, Etchevers-Barra, J. D., Cortés-Pérez, M., Santiago-García, W., Ponce Mendoza, A., & Fuentes-Ponce, M. H. (2021). Almacenamiento de carbono en bosques con manejo forestal comunitario. *Madera y Bosques*, 27(SPE). <https://doi.org/10.21829/MYB.2021.2742421>
- Libert Amico, A., Ituarte-Lima, C., & Elmqvist, T. (2020). Learning from social–ecological crisis for legal resilience building: multi-scale dynamics in the coffee rust epidemic. *Sustainability Science*, 15(2), 485-501. <https://doi.org/10.1007/S11625-019-00703-X/TABLES/3>
- Libert-Amico Antoine. (s. f.). *Paisajes bioculturales ante el cambio climático: Carbono y agrobiodiversidad en cafetales bajo sombra en Chiapas*. Recuperado 16 de octubre de 2022, a partir de https://www.researchgate.net/profile/Fernando-Ayala-Nino/publication/331686086_Costras_biologicas_y_respiracion_edafica_en_un_ecosistema_arido_del_noroeste_de_Mexico/links/5c87eded92851c1df93d3b55/Costras-biologicas-y-respiracion-edafica-en-un-ecosistema-arido-del-noroeste-de-Mexico.pdf#page=94
- Maciej Serda, Becker, F. G., Cleary, M., Team, R. M., Holtermann, H., The, D., Agenda, N., Science, P., Sk, S. K., Hinnebusch, R., Hinnebusch A, R., Rabinovich, I., Olmert, Y., Uld, D. Q. G. L. Q., Ri, W. K. H. U., Lq, V., Frxqw, W. K. H., Zklfk, E., Edvhg, L. v, ... فاطمي ح. (2003). Basis for consistent representation of land areas, Chapter 2. *Uniwersytet Śląski*, 7(1), 343-354. <https://doi.org/10.2/JQUERY.MIN.JS>
- Maciej Serda, Becker, F. G., Cleary, M., Team, R. M., Holtermann, H., The, D., Agenda, N., Science, P., Sk, S. K., Hinnebusch, R., Hinnebusch A, R., Rabinovich, I., Olmert, Y., Uld, D. Q. G. L. Q., Ri, W. K. H. U., Lq, V., Frxqw, W. K. H., Zklfk, E., Edvhg, L. v, ... فاطمي ح. (2019). Land Degradation: IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land 5 Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and 6 Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems. *Uniwersytet Śląski*, 7(1), 1. <https://doi.org/10.2/JQUERY.MIN.JS>
- Marek, M. V., Marková, I., Pavelka, M., Havráňková, K., Macků, J., Rejšek, K., & Janouš, D. (2020). Potential changes in forest soil carbon stocks under different climate change scenarios. *Climate Change and Soil Interactions*, 21-36. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818032-7.00002-3>

- Merle, I., Pico, J., Granados, E., Boudrot, A., Tixier, P., de Melo Virginio Filho, E., Cilas, C., & Avelino, J. (2020). Unraveling the complexity of coffee leaf rust behavior and development in different coffee arabica agroecosystems. *Phytopathology*, 110(2), 418-427. https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-19-0094-R/ASSET/IMAGES/LARGE/PHYTO-03-19-0094-R_F8.JPEG
- Metsaranta, J. M., Kurz, W. A., Neilson, E. T., & Stinson, G. (2010). Implications of future disturbance regimes on the carbon balance of Canada's managed forest (2010-2100). *Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 62(5), 719-728. <https://doi.org/10.1111/J.1600-0889.2010.00487.X/FULL>
- Middendorp, R. S., Boever, O., Rueda, X., & Lambin, E. F. (2020). Improving smallholder livelihoods and ecosystems through direct trade relations: High-quality cocoa producers in Ecuador. *Business Strategy & Development*, 3(2), 165-184. <https://doi.org/10.1002/BSD2.86>
- Moguel, P., & Toledo, V. M. (1999a). Biodiversity Conservation in Traditional Coffee Systems of Mexico. *Conservation Biology*, 13(1), 11-21. <https://doi.org/10.1046/J.1523-1739.1999.97153.X>
- Moguel, P., & Toledo, V. M. (1999b). Biodiversity Conservation in Traditional Coffee Systems of Mexico. *Conservation Biology*, 13(1), 11-21. <https://doi.org/10.1046/J.1523-1739.1999.97153.X>
- Monreal, C. M., Etchevers, J. D., Acosta, M., Hidalgo, C., Padilla, J., López, R. M., Jiménez, L., & Velázquez, A. (2011). A method for measuring above- and below-ground C stocks in hillside landscapes. *https://doi.org/10.4141/S04-086*, 85(4), 523-530. <https://doi.org/10.4141/S04-086>
- Muchane, M. N., Sileshi, G. W., Gripenberg, S., Jonsson, M., Pumariño, L., & Barrios, E. (2020). Agroforestry boosts soil health in the humid and sub-humid tropics: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 295, 106899. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2020.106899>
- Myhre, G., Samset, B. H., Schulz, M., Balkanski, Y., Bauer, S., Berntsen, T. K., Bian, H., Bellouin, N., Chin, M., Diehl, T., Easter, R. C., Feichter, J., Ghan, S. J., Hauglustaine, D., Iversen, T., Kinne, S., Kirkevåg, A., Lamarque, J. F., Lin, G., ... Zhou, C. (2013). Radiative forcing of the direct aerosol effect from AeroCom Phase II simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(4), 1853-1877. <https://doi.org/10.5194/ACP-13-1853-2013>
- Nair, P. K. R. (1993). *An introduction to agroforestry*. 499. https://books.google.com/books/about/An_Introduction_to_Agroforestry.html?hl=es&id=CkVSeRpmlx8C
- Nair, P. K. R. (2014). Grand challenges in agroecology and land use systems. *Frontiers in Environmental Science*, 2(JAN), 1. <https://doi.org/10.3389/FENVS.2014.00001/BIBTEX>

- Nave, L., Marín-Spiotta, E., Ontl, T., Peters, M., & Swanston, C. (2019). *Soil carbon management*. 36, 215-257. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63998-1.00011-2>
- Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica | USAGov. (s. f.). Recuperado 17 de octubre de 2022, a partir de <https://www.usa.gov/espanol/agencias-federales/oficina-nacional-de-administracion-oceanica-y-atmosferica>
- Ordóñez, J. A. B., de Jong, B. H. J., García-Oliva, F., Aviña, F. L., Pérez, J. v., Guerrero, G., Martínez, R., & Maser, O. (2008). Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacan, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 255(7), 2074-2084. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2007.12.024>
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988-993. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1201609/SUPPL_FILE/PAPV2.PDF
- Paustian, K., Larson, E., Kent, J., Marx, E., & Swan, A. (2019). Soil C Sequestration as a Biological Negative Emission Strategy. *Frontiers in Climate*, 1, 8. <https://doi.org/10.3389/FCLIM.2019.00008/BIBTEX>
- Paz Pellat, F., & Postgraduados, C. de. (2020). *DESARROLLO DE MECANISMOS FINANCIEROS ALTERNATIVOS PARA CAFETALES BAJO SOMBRA EN LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS, MÉXICO THE*. November.
- Peichl, M., & Arain, M. A. (2006). Above- and belowground ecosystem biomass and carbon pools in an age-sequence of temperate pine plantation forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 140(1-4), 51-63. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2006.08.004>
- Perfecto, I., Jiménez-Soto, M. E., & Vandermeer, J. (2019). Coffee landscapes shaping the anthropocene: Forced simplification on a complex agroecological landscape. *Current Anthropology*, 60(S20), S236-S250. https://doi.org/10.1086/703413/ASSET/IMAGES/LARGE/FG6_ONLINE.JPEG
- Plieninger, T., Muñoz-Rojas, J., Buck, L. E., & Scherr, S. J. (2020). Agroforestry for sustainable landscape management. *Sustainability Science*, 15(5), 1255-1266. <https://doi.org/10.1007/S11625-020-00836-4/FIGURES/2>
- Prentice, I. C., Farquhar, G. D., Fasham, M. J. R., Goulden, M. L., Heimann, M., Jaramillo, V. J., Kheshgi, H. S., Quéré, C. le, Scholes, R. J., Wallace, D. W. R., Archer, D., Ashmore, M. R., Aumont, O., Baker, D., Battle, M., Bender, M., Bopp, L. P., Bousquet, P., Caldeira, K., ... Yool, A. (2001). *The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03333974>

Productividad primaria neta aérea en plantaciones comerciales de Eucalyptus urophylla S. T. Blake en Huimanguillo, Tabasco, México. (s. f.). Recuperado 16 de octubre de 2022, a partir de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952017000300343&script=sci_arttext

Programa Mexicano del Carbono. (s. f.). Recuperado 17 de octubre de 2022, a partir de <http://pmcarbono.org/pmc/>

Ram, A., Dev, I., Uthappa, A. R., Kumar, D., Kumar, N., Chaturvedi, O. P., Dotaniya, M. L., & Meena, B. P. (2017). Reactive Nitrogen in Agroforestry Systems of India. *The Indian Nitrogen Assessment: Sources of Reactive Nitrogen, Environmental and Climate Effects, Management Options, and Policies*, 207-218. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811836-8.00014-8>

Ricciardi, V., Ramankutty, N., Mehrabi, Z., Jarvis, L., & Chookolingo, B. (2018). How much of the world's food do smallholders produce? *Global Food Security*, 17, 64-72. <https://doi.org/10.1016/J.GFS.2018.05.002>

Ruiz Sinoga, J. D., Pariente, S., Diaz, A. R., & Martinez Murillo, J. F. (2012). Variability of relationships between soil organic carbon and some soil properties in Mediterranean rangelands under different climatic conditions (South of Spain). *CATENA*, 94, 17-25. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2011.06.004>

Ruiz-de-Oña, C., & Merlín-Urbe, Y. (2021). New Varieties of Coffee: Compromising the Qualities of Adaptive Agroforestry? A Case Study From Southern Mexico. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 123. <https://doi.org/10.3389/FSUFS.2021.620422/BIBTEX>

Sabine, C. L., Feely, R. A., Gruber, N., Key, R. M., Lee, K., Bullister, J. L., Wanninkhof, R., Wong, C. S., Wallace, D. W. R., Tilbrook, B., Millero, F. J., Peng, T. H., Kozyr, A., Ono, T., & Rios, A. F. (2004). The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*, 305(5682), 367-371. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1097403/SUPPL_FILE/SABINE.SOM.PDF

Salimath, S., Manasa, C., Nanaya, K., & Hegde, R. (2021). Árboles en tierras agrícolas: una fuente subexplotada para lograr la seguridad nutricional en la India. *Resiliencia y Conflictos*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012822931600023X>

Schjørring, P., Jensen, J. L., Bruun, S., Jensen, L. S., Christensen, B. T., Munkholm, L. J., Oelofse, M., Baby, S., & Knudsen, L. (2018). The Role of Soil Organic Matter for Maintaining Crop Yields: Evidence for a Renewed Conceptual Basis. *Advances in Agronomy*, 150, 35-79. <https://doi.org/10.1016/BS.AGRON.2018.03.001>

Schmitt-Harsh, M., Evans, T. P., Castellanos, E., & Randolph, J. C. (2012). Carbon stocks in coffee agroforests and mixed dry tropical forests in the western highlands of Guatemala. *Agroforestry Systems* 2012 86:2, 86(2), 141-157. <https://doi.org/10.1007/S10457-012-9549-X>

- Schroth, G., Laderach, P., Dempewolf, J., Philpott, S., Hagggar, J., Eakin, H., Castillejos, T., Moreno, J. G., Pinto, L. S., Hernandez, R., Eitzinger, A., & Ramirez-Villegas, J. (2009). Towards a climate change adaptation strategy for coffee communities and ecosystems in the Sierra Madre de Chiapas, Mexico. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 14(7), 605-625. <https://doi.org/10.1007/S11027-009-9186-5/FIGURES/6>
- Schulp, C. J. E., Nabuurs, G. J., Verburg, P. H., & de Waal, R. W. (2008). Effect of tree species on carbon stocks in forest floor and mineral soil and implications for soil carbon inventories. *Forest Ecology and Management*, 256(3), 482-490. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2008.05.007>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera | Gobierno | gob.mx. (s. f.). Recuperado 17 de octubre de 2022, a partir de <https://www.gob.mx/siap>
- Sha, Z., Bai, Y., Li, R., Lan, H., Zhang, X., Li, J., Liu, X., Chang, S., & Xie, Y. (2022). The global carbon sink potential of terrestrial vegetation can be increased substantially by optimal land management. *Communications Earth & Environment* 2022 3:1, 3(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00333-1>
- Shukla, P. R., Skeg, J., Buendia, E. C., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., Diemen, S. van, Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Pathak, M., Petzold, J., Pereira, J. P., Vyas, P., Huntley, E., Kissick, K., ... Malley, J. (2019). *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. <https://philpapers.org/rec/SHUCCA-2>
- Smith, P. (2008). Land use change and soil organic carbon dynamics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 81(2), 169-178. <https://doi.org/10.1007/S10705-007-9138-Y/TABLES/1>
- Soil carbon dynamics in high-elevation temperate forests of Oaxaca (Mexico): thinning and rainfall effects*. (s. f.-a). <https://doi.org/10.4067/S0717-92002012000100001>
- Soil carbon dynamics in high-elevation temperate forests of Oaxaca (Mexico): thinning and rainfall effects*. (s. f.-b). <https://doi.org/10.4067/S0717-92002012000100001>
- Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry* - Google Libros. (s. f.). Recuperado 16 de octubre de 2022, a partir de https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=gDnLAWAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA383&dq=Methods+for+Studying+Soil+Organic+Matter&ots=rgulJUvZhh&sig=AZEJF2pC45jORp0_xM6O-NWtjFk#v=onepage&q=Methods%20for%20Studying%20Soil%20Organic%20Matter&f=false
- Soto-Pinto, L., & Aguirre-Dávila, C. M. (2015). Carbon stocks in organic coffee systems in Chiapas, Mexico. *Journal of Agricultural Science (Toronto)*, 7(1), 117-128.

- Stockmann, U., Adams, M. A., Crawford, J. W., Field, D. J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., Minasny, B., McBratney, A. B., Courcelles, V. de R. de, Singh, K., Wheeler, I., Abbott, L., Angers, D. A., Baldock, J., Bird, M., Brookes, P. C., Chenu, C., Jastrow, J. D., Lal, R., ... Zimmermann, M. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, 80-99. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2012.10.001>
- Therville, C., Antona, M., & de Foresta, H. (2020). The policyscape of agroforestry within Mediterranean protected landscapes in France. *Sustainability Science*, 15(5), 1435-1448. <https://doi.org/10.1007/S11625-020-00821-X/FIGURES/4>
- Thomazini, A., Mendonça, E. S., Cardoso, I. M., & Garbin, M. L. (2015). SOC dynamics and soil quality index of agroforestry systems in the Atlantic rainforest of Brazil. *Geoderma Regional*, 5, 15-24. <https://doi.org/10.1016/J.GEODRS.2015.02.003>
- Toledo, V. M., & Moguel, P. (2012). Coffee and Sustainability: The Multiple Values of Traditional Shaded Coffee. *https://Doi.Org/10.1080/10440046.2011.583719*, 36(3), 353-377. <https://doi.org/10.1080/10440046.2011.583719>
- Tropical Montane Cloud Forests: Science for Conservation and Management - Google Libros.* (s.f.). Recuperado 17 de octubre de 2022, a partir de https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=N6FkwMnSX8EC&oi=fnd&pg=PA90&dq=Nutrient+cycling+and+nutrient+limitation+in+tropical+montane+cloud+forests&ots=f5Caic69EL&sig=mkbL5bAQSXYVDXLH98DAyEvh13ig&redir_esc=y#v=onepage&q=Nutrient%20cycling%20and%20nutrient%20limitation%20in%20tropical%20montane%20cloud%20forests&f=false
- Tumwebaze, S. B., & Byakagaba, P. (2016). Soil organic carbon stocks under coffee agroforestry systems and coffee monoculture in Uganda. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 216, 188-193. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2015.09.037>
- van Noordwijk, M. (2019). Integrated natural resource management as pathway to poverty reduction: Innovating practices, institutions and policies. *Agricultural Systems*, 172, 60-71. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2017.10.008>
- van Rikxoort, H., Schroth, G., Läderach, P., & Rodríguez-Sánchez, B. (2014). Carbon footprints and carbon stocks reveal climate-friendly coffee production. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(4), 887-897. <https://doi.org/10.1007/S13593-014-0223-8/FIGURES/3>
- Villavicencio-Enríquez, L., & Valdez-Hernández, J. I. (s.f.). *ANALYSIS OF TREE STRUCTURE IN THE TRADITIONAL COFFEE AGROFORESTRY SYSTEM IN SAN MIGUEL, VERACRUZ, MÉXICO.*
- Waring, B., Neumann, M., Prentice, I. C., Adams, M., Smith, P., & Siegert, M. (2020). Forests and Decarbonization – Roles of Natural and Planted Forests. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 58. <https://doi.org/10.3389/FFGC.2020.00058/BIBTEX>

- Williams, L. J. (s. f.). *Fisher's Least Significant Difference (LSD) Test*. Recuperado 16 de octubre de 2022, a partir de <https://www.researchgate.net/publication/242181775>
- Yamallel, J. I. Y., Pérez, J. J., Calderón, O. A. A., & Garza, E. J. T. (2012). Contenido de carbono total en los componentes de especies arbóreas y arbustivas en áreas con diferente uso, en el matorral espinoso tamaulipeco, en México. *Bosque (Valdivia)*, 33(2), 145-152. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002012000200004>
- Yepes, A., & Buckeridge, M. S. (2011). RESPUESTAS DE LAS PLANTAS ANTE LOS FACTORES AMBIENTALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL: REVISIÓN. *Colombia Forestal*, 14(2), 213-232. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-07392011000200006&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Yost, J. L., & Hartemink, A. E. (2019). Soil organic carbon in sandy soils: A review. *Advances in Agronomy*, 158, 217-310. <https://doi.org/10.1016/BS.AGRON.2019.07.004>
- Zinngrebe, Y., Borasino, E., Chiputwa, B., Dobie, P., Garcia, E., Gassner, A., Kihumuro, P., Komarudin, H., Liswanti, N., Makui, P., Plieninger, T., Winter, E., & Hauck, J. (2020). Agroforestry governance for operationalising the landscape approach: connecting conservation and farming actors. *Sustainability Science*, 15(5), 1417-1434. <https://doi.org/10.1007/S11625-020-00840-8/FIGURES/3>
- Zomer, R. J., & Trabucco, A. (2014). Trees on farms: an update and reanalysis of agroforestry's global extent and socio-ecological characteristics HELP-ACEH View project Millennium Villages Project View project 76 PUBLICATIONS 4,955 CITATIONS SEE PROFILE. <https://www.researchgate.net/publication/262914994>