



## CARBON STORAGE IN TREE BIOMASS AND SOILS IN SILVOPASTORAL SYSTEMS OF THE HUMID TROPICS †

[ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LA BIOMASA ARBÓREA Y EL SUELO EN SISTEMAS SILVOPASTORILES DEL TRÓPICO HÚMEDO]

C. A. De-la-Cruz-López<sup>1</sup>, G. Villanueva-López<sup>1\*</sup>, F. Casanova-Lugo<sup>2</sup>, P. Martínez-Zurimendi<sup>3,4</sup> and D. R. Aryal<sup>5,6</sup>

<sup>1</sup>*Ganadería Sustentable y Cambio Climático, El Colegio de la Frontera Sur, Carretera a Reforma Km 5.5 s/n, Ra. Guineo Segunda Sección. CP. 86280. Villahermosa, Tabasco, México. [cesar.delacruz@posgrado.ecosur.mx](mailto:cesar.delacruz@posgrado.ecosur.mx);*

*[gwillanueva@ecosur.mx](mailto:gwillanueva@ecosur.mx)*

<sup>2</sup>*Tecnológico Nacional de México Campus I. T. Zona Maya, Carretera Chetumal-Escárcega km 21.5, Ejido Juan Sarabia. CP. 77960. Othón P. Blanco, Quintana Roo, México. [fkzanov@gmail.com](mailto:fkzanov@gmail.com)*

<sup>3</sup>*Agroecología, El Colegio de la Frontera Sur, Carretera a Reforma Km 5.5 s/n, Ra. Guineo Segunda Sección. CP. 86280. Villahermosa, Tabasco, México.*

*[pmartinez@ecosur.mx](mailto:pmartinez@ecosur.mx)*

<sup>4</sup>*Sustainable Forest Management Research Institute UVa-INIA, ETS Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid, Avenida de Madrid, núm. 57, Palencia, España.*

<sup>5</sup>*CONAHCYT-UNACH, Facultad de Ciencias Agronómicas. Carretera Ocozocoautla - Villaflores km. 84.5. Apartado postal #78, CP. 30470. Villaflores, Chiapas, México.*

*[deb.raj@unach.mx](mailto:deb.raj@unach.mx)*

<sup>6</sup>*New Mexico State University, Agricultural Science Center, Clovis NM, USA.*

*\*Corresponding author*

### SUMMARY

**Background:** The transformation native of forests into pasturelands for livestock farming, affects ecosystems carbon (C) stores and soil properties. **Objective:** Estimate the carbon stored in tree biomass (above and below ground) and determine soil organic carbon and some physical and chemical properties in two silvopastoral systems (SPS): scattered trees in paddocks (STP) and living fences (LF), taking grass monoculture (PM) as reference. **Methodology:** The C content in the above and below-ground biomass of the trees was estimated through allometric models, the C fraction of the soil from 0-100 cm was determined by chemical digestion, and the soil organic carbon (SOC) stock was estimated. The physical and chemical properties of the soil were determined. **Results:** SSPs with STP and LF stored a greater amount of total C (387.0 and 362.6 Mg ha<sup>-1</sup> de C) compared to GM (312.5 Mg ha<sup>-1</sup> de C), tree biomass contributed 6.3% and 8.4% for STP and LF respectively. Soils stored 90% of the total C in STP and LF. The tree component favorably modified soil pH, the bulk density, the organic matter, carbon, and nitrogen content. **Implications:** This study contributes with scientific information useful to develop low-emission livestock systems for transition towards climate-smart farming systems essential to meet the Sustainable Development Goals. **Conclusions:** Tree diversity and density in STP ADP and LF play an important role in the storage of total C, favor C accumulation in the deeper layers of the soil and improve the physical and chemical properties of the soil. **Key words:** agroforestry; tree biomass; carbon reservoirs; environmental services; soils; silvopastoral systems.

### RESUMEN

**Antecedentes:** La transformación de las selvas en pastizales para la ganadería, afecta los almacenes de carbono (C) del ecosistema y a las características del suelo. **Objetivo:** Estimar el carbono almacenado en la biomasa arbórea (aérea y subterránea) y determinar el carbono orgánico del suelo y algunas propiedades físicas y químicas del suelo en dos sistemas silvopastoriles (SSP): árboles dispersos en potreros (ADP) y cercas vivas (CV), tomando como referencia el

† Submitted July 5, 2023 – Accepted November 5, 2023. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5055>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = C.A. De la Cruz López: <http://orcid.org/0000-0002-7212-397X>; F. Casanova-Lugo: <http://orcid.org/0000-0003-2485-9170>; P. Martínez-Zurimendi: <http://orcid.org/0000-0002-8031-6448>; D. R. Aryal: <http://orcid.org/0000-0003-4188-3084>; G. Villanueva-López: <http://orcid.org/0000-0001-9200-2553>

monocultivo de pasto (MP). **Metodología:** El contenido de C en la biomasa aérea y subterránea de los árboles se estimó mediante modelos alométricos. La fracción de C del suelo de 0-100 cm se determinó mediante la digestión química y se estimó el stock de carbono orgánico del suelo (COS). Se determinaron las propiedades físicas y químicas del suelo. **Resultados:** ADP y CV almacenaron una mayor cantidad de C total (387.0 y 362.6 Mg ha<sup>-1</sup> de C) en comparación con los MP (312.5 Mg ha<sup>-1</sup> de C), la biomasa arbórea contribuyó en un 6.3% y 8.4% en ADP y CV respectivamente. Los suelos almacenan el 90% del C total en ADP y CV. El componente arbóreo modificó favorablemente el pH, la densidad aparente del suelo, la materia orgánica, el contenido de carbono y nitrógeno. **Implicaciones:** Este estudio contribuye con información científica útil para desarrollar sistemas ganaderos de bajas emisiones para la transición hacia sistemas agrícolas climáticamente inteligentes esenciales para cumplir con los Objetivos del Desarrollo Sostenible. **Conclusiones:** La diversidad y densidad arbórea en ADP y CV juegan un papel importante en el almacenamiento de C total, favorecen la acumulación de C en las capas más profundas del suelo, y mejoran las propiedades físicas y químicas del suelo. **Palabras clave:** agroforestería; biomasa arbórea; reservorios de carbono; servicios ambientales; suelos; sistemas silvopastoriles.

## INTRODUCCIÓN

Durante los próximos 80 años, se prevé que los cambios bruscos de temperatura aumenten sustancialmente en todo el mundo como parte del cambio climático (CC). Por ello, se deben buscar prácticas agrícolas y ganaderas que intenten mitigar estos impactos y promuevan la conservación de los ecosistemas (Laborde *et al.*, 2021). No obstante, en algunas regiones como las del trópico, la agricultura, especialmente la actividad ganadera son unas de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el cambio de uso del suelo es el origen a nivel global de una cuarta parte de las emisiones de GEI (Lemes *et al.*, 2021).

La transformación sin precedentes de la cobertura forestal en áreas de pastizales desde mediados del siglo XX ha contribuido a que las emisiones de GEI del sector pecuario aumenten 51% a nivel mundial y 117% en los países en desarrollo (Caro *et al.*, 2014; Havlík *et al.*, 2014). Los principales GEI con que contribuye la ganadería son las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O); estos gases contribuyen, aproximadamente, entre el 12 y el 18% de las emisiones totales a la atmósfera (Houghton y Nassikas, 2017). Los desastres originados por el CC y los derivados de cambio de uso del suelo se suman a la deforestación y a la degradación de suelos ocasionada por el establecimiento de pasturas para el desarrollo de la ganadería bovina de forma extensiva (Caro *et al.*, 2014). A pesar de sus impactos ambientales desfavorables, la ganadería es una fuente importante de alimento y de sustento de millones de familias. La ganadería aporta más del 50% del requerimiento de proteína de la dieta de la población en forma de leche y carne y es la principal fuente de ingresos de millones de familias pobres, generando miles de empleos permanentes y temporales (Steinfeld y Wassenaar, 2007).

Para el Estado de Tabasco, estos aspectos de agroecosistemas simplificados y el carácter insostenible de los sistemas ganaderos manejados de

forma extensiva, aunado al escenario actual de cambio climático global, están agudizando cada vez más las tendencias de deterioro de estos sistemas alejándolos de la sustentabilidad (Villanueva-López *et al.*, 2019; Lemes *et al.*, 2021; Valenzuela-Que *et al.*, 2022). En este sentido, evaluamos alternativas de producción ganadera concebidas para proveer de servicios ecosistémicos sostenibles y con alto potencial productivo equilibrados con la conservación de los recursos y el medio ambiente, que permitan al sector ganadero disponer de estrategias de adaptación al CC, es una prioridad (Villanueva-López *et al.*, 2015; Aryal *et al.*, 2019).

Los sistemas silvopastoriles (SSP) constituyen una alternativa de producción pecuaria sustentable, de bajas emisiones de GEI, competitiva, que implica la integración de árboles, pastos, y ganado bajo un sistema de manejo integral, para mejorar la resiliencia agroecológica y comunitaria frente al CC, al combinar funciones productivas con servicios ambientales, y pueden ser capaces de contribuir en esta dirección (Lemes *et al.*, 2021; Sales-Baptista y Ferraz-de-Oliveira, 2021). En climas tropicales estos sistemas proveen de fuentes de alimentos de mayor valor nutritivo y de fácil acceso para el ganado, que los hace más productivos, rentables, duraderos y resilientes al CC, capaces de garantizar la seguridad alimentaria. Mejoran las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, debido a la fijación de N atmosférico a través de asociaciones simbióticas, y por la entrada de hojarasca por encima y de raíces por debajo del suelo generadas por el arbolado, que contribuyen a frenar la degradación del suelo (Aryal *et al.*, 2019; Polanía-Hincapié *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2021). Contribuyen a la conservación de la biodiversidad tanto en la escala de parcela como de paisaje al proporcionar hábitat, recursos alimenticios, conectividad entre paisajes fragmentados y como corredores biológicos para una amplia gama de especies de plantas y animales que habitan en los paisajes ganaderos, brindando servicios ambientales e incluyendo la conservación de especies amenazadas en estos sistemas y la restauración de los paisajes ganaderos degradados (Dawud *et al.*, 2016;

Cárdenas *et al.*, 2019). En las últimas décadas han sido reconocidos por su potencial para mitigar el CC ya que pueden almacenar grandes cantidades de C en la biomasa aérea, hojarasca y reservorios del suelo, además de funcionar como sumideros de CO<sub>2</sub> dependiendo de las propiedades del clima y uso del suelo (Aryal *et al.*, 2019; Ferreiro-Domínguez *et al.*, 2022). Al respecto Valenzuela-Que *et al.* (2022) encontraron que los SSP con árboles dispersos en potreros de la sierra de Tabasco logran almacenar un 58.8% más C que en los sistemas ganaderos basados en el monocultivo de pastos. De igual manera, Villanueva-López *et al.* (2015) en esta misma región encontraron que los SSP con presencia de cercas vivas almacenan 119.82 Mg ha<sup>-1</sup> de C superior a los 113.34 Mg ha<sup>-1</sup> de C almacenados en sistemas basados en el monocultivo de pasto.

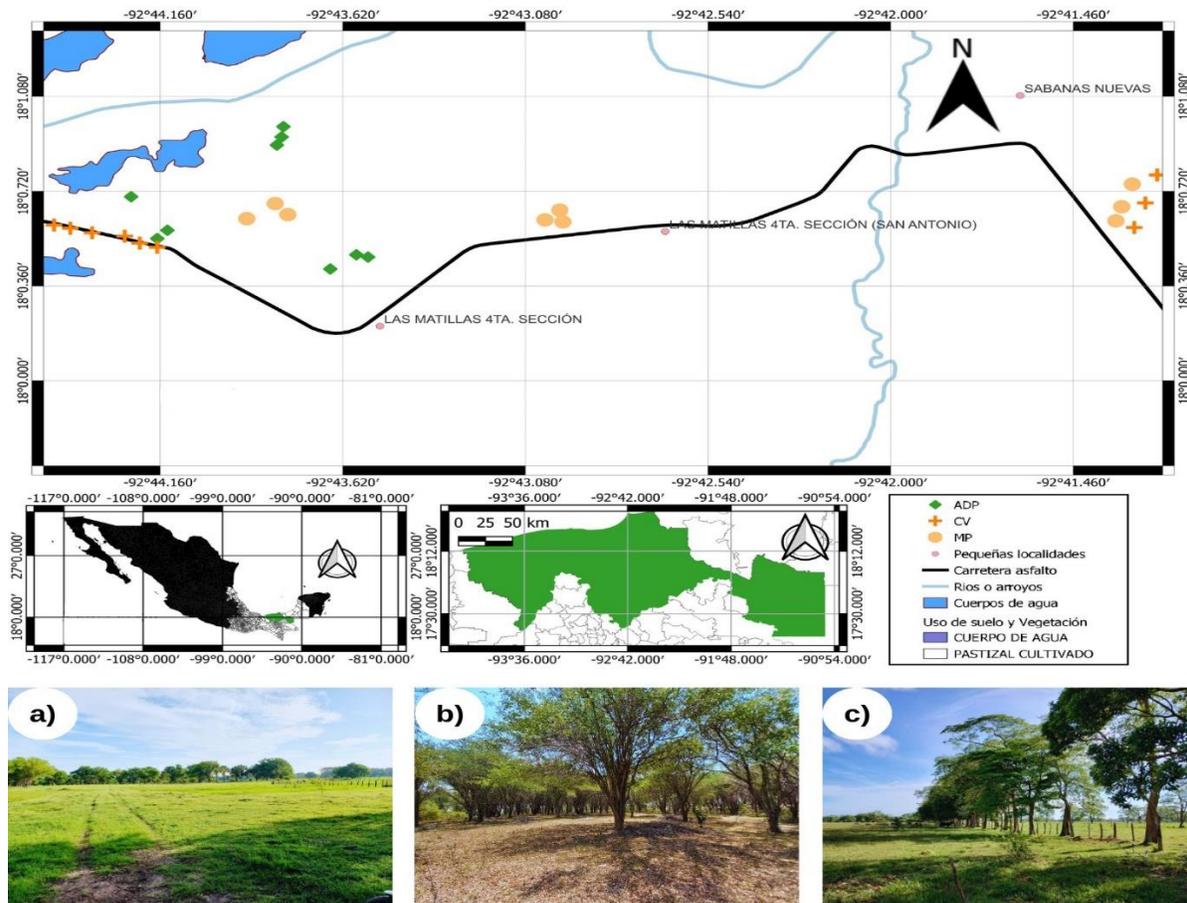
Desafortunadamente muy poco se sabe del potencial de los sistemas ganaderos para almacenar C en áreas caracterizadas por suelos inundables. Desde esta perspectiva, y dada la preocupación mundial sobre el CC, es necesario monitorear los almacenes de C en

estos sistemas ganaderos para tener un panorama más claro del potencial de mitigación y adaptación al CC (Valenzuela-Que *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2023). El objetivo de este estudio fue estimar el carbono almacenado en la biomasa arbórea (aérea y subterránea) y determinar el carbono orgánico del suelo y algunas propiedades físicas y químicas del suelo en dos sistemas silvopastoriles (SSP): árboles dispersos en potreros (ADP) y cercas vivas (CV), teniendo como referencia a sistemas ganaderos basados en el monocultivo de pasto (MP). Partimos del supuesto de que el C almacenado en los reservorios de los sistemas ganaderos se verá influenciado por las características físicas y químicas de los suelos, así como por el componente arbóreo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El estudio se realizó en la ranchería “Las Matillas” 4ª sección, en el municipio de Centro, Tabasco (Figura 1). La localidad de estudio se encuentra en la zona del trópico húmedo mexicano (18°0'11.30" N, 92°43'36.22" O), la



**Figura 1.** Ubicación de los sitios de muestreo en la ranchería “Las Matillas” en Centro, Tabasco; a) monocultivo de pastos, b) árboles dispersos en potreros, c) cercas vivas (Gráfico de elaboración propia, fotografías de De-la-Cruz-López, C. A.).

cual presenta un clima húmedo con abundantes lluvias en verano (Am), temperatura promedio que oscila entre los 26 y 28 °C y precipitación anual promedio entre los 1500 y 2500 mm. El área de estudio tiene una topografía plana con una elevación que oscila entre los 5 y 8 msnm. El tipo de suelo que predomina en la zona son los vertisoles (Palma-López *et al.*, 2018).

### Característica y selección de los sistemas de estudio

Se seleccionaron dos tipos de SSP de la región: 1) con árboles dispersos en potrero (ADP), 2) con cercas vivas (CV), además, un sistema ganadero basado en el monocultivo de pastos (MP). La tabla 1 muestra las

principales características de dichos sitios de estudio. El área de estudio se corresponde con un total de nueve ranchos (tratamientos), en cada uno de los cuales se asignaron aleatoriamente tres parcelas para establecer un total de 27 parcelas de muestreo. En el SSP con CV y en el sistema ganadero en MP la forma de las parcelas fue rectangular con un tamaño de 1000 m<sup>2</sup> (50 m x 20 m). Para el SSP con ADP la forma de las parcelas fue circular con un radio de 17.80 m (Figura 2) (Villanueva-López *et al.*, 2015; Valenzuela-Que *et al.*, 2022). En cada una de las parcelas se realizó el inventario del componente arbóreo. Las muestras de suelo se tomaron en el centro de cada parcela.

**Tabla 1. Características biofísicas de los sistemas ganaderos basados en el monocultivo de pastos (MP) y los sistemas silvopastoriles (ADP y CV) en Centro, Tabasco.**

Características	Sistemas		
	MP	ADP	CV
Edad del sistema	15-25	25-30	20-30
Elevación (msnm)	5-8	5-6	6-8
Topografía del sitio	Plana	Plana	Plana
Objetivos de producción	Engorda de novillos	Engorda de novillos y doble propósito	Engorda de novillos
Tipo de sistema de pastoreo	intensivo	Semi intensivo	Semi intensivo
Días de pastoreo	15	15-20	20
Potreros rotacionales	Si	Si	Si
Densidad de árboles (ind ha <sup>-1</sup> )	-	116	-
Densidad de árboles (ind m <sup>-1</sup> )	-	-	4.5
Índice de dominancia (D)*	-	0	0.527
Índice de Shannon (H')*	-	0	1.194
Equitatividad (J)*	-	ND	0.527
Número total de especies (árboles)	-	1	8
Especies arbóreas	-	<i>Haematoxylum campechianum</i> L.	<i>Tabebuia rosea</i> DC., <i>Tectona grandis</i> Lf, <i>Delonix regia</i> (Bojer ex Hook.) Raf., <i>Cassia fistula</i> L., <i>Stemmadenia donnell-smithii</i> Woodson, <i>Psidium guajava</i> L., <i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn. y <i>Tabebuia chrysantha</i> G.Nicholson
Especies de pastos	<i>Cynodon plectostachyus</i> (K.Schum.) Pilg., <i>Ischaemum aristatum</i> L. y <i>Paspalum notatum</i> Flüggé	<i>Ischaemum aristatum</i> L., <i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers., <i>Paspalum notatum</i> Flüggé, <i>Axonopus compressus</i> P.Beauv., <i>Paspalum conjugatum</i> P.J.Bergius y <i>Pennisetum setaceum</i> (Forssk.) Chiov.	<i>Ischaemum aristatum</i> L., <i>Paspalum conjugatum</i> P.J.Bergius, <i>Axonopus compressus</i> P.Beauv., <i>Pennisetum setaceum</i> (Forssk.) Chiov. y <i>Paspalum notatum</i> Flüggé
Tipo de suelo	Vertisol	Vertisol	Vertisol

\*Índices ecológicos de diversidad del componente arbóreo, ND: No detectado, MP: Monocultivo de pastos, ADP: Árboles dispersos en potreros, CV: Cercas vivas.

## Muestreo de suelos y análisis de laboratorio

En cada parcela se elaboró de forma manual una calicata de  $1 \times 1 \times 1$  m. En cada una se tomó una muestra inalterada de suelo en una pared de la calicata en estratos de 10 cm (0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90 y 90-100 cm) (Chatterjee *et al.*, 2020) que sirvió para determinar el carbono orgánico del suelo (COS) y la densidad aparente del suelo (DA). Al finalizar el muestreo, el suelo de cada profundidad en cada parcela fue mezclado hasta alcanzar un color uniforme y se tomó una submuestra de aproximadamente 500 g, para los análisis físicos y químicos.

Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Estudios Avanzados en Agroecosistemas del TecNM campus I.T. Zona Maya. A cada una de las muestras se les determinó el pH en una relación 1:2 y la textura del suelo (hidrómetro de Bouyoucos) (De la Cruz López *et al.*, 2018). La DA se determinó por el método de la probeta. El contenido de carbono (% C) y nitrógeno (% N) mediante el método de combustión seca con un analizador elemental CHNS/O (Perkin Elmer 2400 Serie II). El contenido de materia orgánica (MO) se estimó a partir del contenido de (%C) mediante el factor de conversión 1.724 (Valenzuela-Que *et al.*, 2022). La relación C/N se calculó dividiendo los contenidos de C entre los contenidos de N del suelo.

## Biomasa arbórea

En cada parcela se midió el diámetro de todos los árboles a la altura del pecho (DAP >10 cm). La altura total de los árboles se midió utilizando una pistola láser Criterion RD 1000 (Laser Technology Inc. USA). Se identificaron los árboles por su nombre científico y

común. Posteriormente, a nivel de especie, se identificaron los datos de densidad de madera en la base de datos global (Zanne *et al.*, 2009).

La biomasa aérea de cada árbol (BA) se cuantificó aplicando la ecuación propuesta por Chave *et al.* (2014):

$$BA (kg) = 0.0673(\rho \times D^2 \times H)^{0.976}$$

Donde:

BA = Biomasa aérea de cada árbol (kg)  
 $\rho$  = Densidad de madera de la especie ( $g\ cm^{-3}$ )  
 D = Diámetro a la altura del pecho (cm)  
 H = Altura total del árbol (m)

El stock de AGB ( $Mg\ ha^{-1}$ ) se estimó aplicando la siguiente ecuación:

$$AGB (Mg\ ha^{-1}) = \frac{\sum BA\ por\ árbol\ (kg)}{\text{Área de muestreo}\ (m^2)} \times 10$$

Donde:

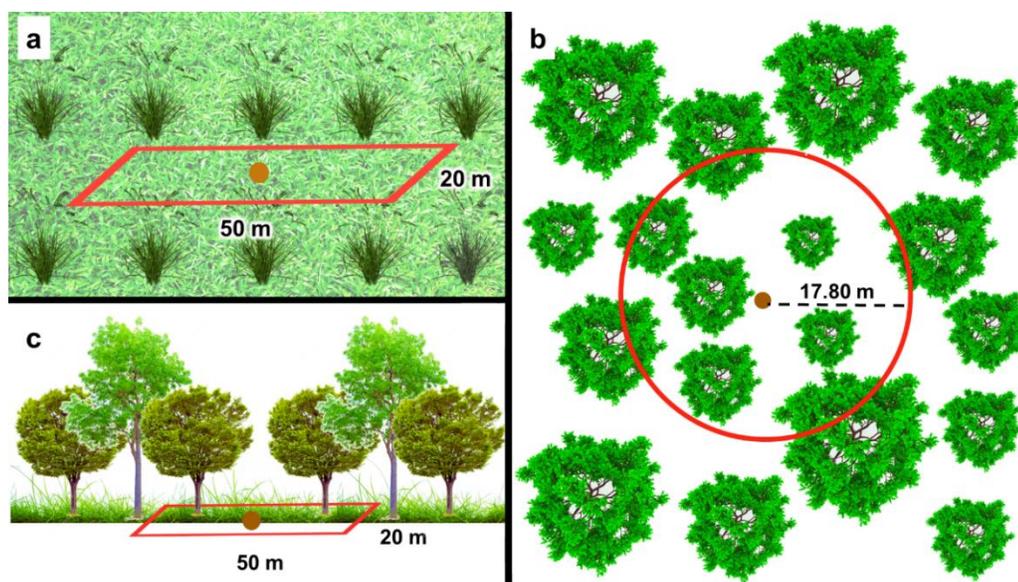
AGB = Biomasa aérea de los árboles por hectárea ( $Mg\ ha^{-1}$ )  
 BA = Biomasa aérea de cada árbol de la parcela (kg)

La biomasa de las raíces se estimó utilizando la ecuación propuesta por Cairns *et al.* (1997):

$$BR (Mg\ ha^{-1}) = \exp(-1.085 + 0.926 \ln (AGB))$$

Donde:

BR = Biomasa de raíces de los árboles ( $Mg\ ha^{-1}$ )  
 AGB = Biomasa aérea ( $Mg\ ha^{-1}$ )



**Figura 2.** Tamaños y formas de las parcelas de muestreo en los sistemas de estudio. A) sistema ganadero en monocultivo de pasto, b) sistema silvopastoril con árboles dispersos en potreros y c) sistema silvopastoril con cercas vivas (elaboración propia).

## Carbono en la biomasa arbórea

Se estimó multiplicando los valores de biomasa aérea y de raíces de cada árbol por el factor 0.5 sugerido para las especies arbóreas en regiones tropicales (Brown, 2002).

### Almacenes de carbono orgánico del suelo

El almacenamiento de COS hasta los 100 cm de profundidad en cada sistema se calculó utilizando los resultados de laboratorio de DA, el contenido de %C de cada estrato y la profundidad de muestreo. Posteriormente se sumaron el COS en cada profundidad analizada. El COS en cada rango de profundidad se calculó mediante la ecuación propuesta por Aryal *et al.* (2019):

$$COS (Mg\ ha^{-1}\ C) = \frac{CC \times DA \times PM \times 10000}{100}$$

Dónde:

COS = Carbono orgánico del suelo (Mg ha<sup>-1</sup> de C)

CC = Contenido del carbono (%C)

DA = Densidad aparente del suelo (g cm<sup>-3</sup>)

PM = Espesor del estrato de suelo considerado (m).

### Almacenamiento de carbono a nivel de sistema

Se estimó empleando la ecuación para condiciones tropicales (Valenzuela-Que *et al.*, 2022):

$$C\ almacenado (Mg\ ha^{-1}\ C) = AGB + BR + COS$$

Dónde:

C almacenado = Sumatoria de los reservorios de C

AGB = Biomasa aérea (Mg ha<sup>-1</sup> de C)

BR = Biomasa de la raíz (Mg ha<sup>-1</sup> de C)

COS = C orgánico del suelo (Mg ha<sup>-1</sup> de C).

### Análisis de datos

Se comprobaron los supuestos de normalidad de los datos con la prueba de Kolmogórov-Smirnov. La homogeneidad de varianzas se analizó a partir de la prueba de Levene. Los datos del presente estudio no presentaron una distribución normal, por tanto, se les aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis seguida de la prueba Mann-Whitney con la finalidad de comparar las diferencias entre medias y determinar el efecto sobre el almacenamiento de carbono (biomasa arbórea y suelo), los sistemas en estudio y la profundidad del suelo. Finalmente se analizó la correlación entre el COS y las variables físicas y químicas del suelo utilizando el coeficiente de correlación de Spearman. La prueba estadística se tuvo un nivel de significancia del 95%. Todos los datos estadísticos fueron procesados con el software Statística versión 8.0 para Windows.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Almacenamiento de C del componente arbóreo

El análisis estadístico mostró diferencias significativas entre los sistemas evaluados ( $H = 9.03$ ,  $P = 0.025$ ). La mayor cantidad se almacenó en SSP con CV en relación con SSP con ADP (Tabla 2). Este mismo comportamiento se observó en la biomasa bajo el suelo. Sin embargo, en ambos sistemas el almacenamiento de C fue mayor en la biomasa aérea. En consecuencia, el sistema SSP con CV tuvo 19.7% más C almacenado en la biomasa total que en SSP con ADP. La mayor cantidad de C almacenado en el componente arbóreo en SSP con CV (Tabla 2) podría atribuirse a una mayor riqueza y diversidad de árboles, como lo muestra el índice de diversidad ( $H'$ ) (Tabla 1). Mientras que la menor cantidad de C almacenado en el componente arbóreo en SSP con ADP podría deberse a que estuvo constituido únicamente por la especie *Haematoxylum campechianum* L. (Tabla 1). Los resultados encontrados en SSP con CV fueron mayores a lo reportado por Villanueva-López *et al.* (2015) (6.4 Mg ha<sup>-1</sup> de C) en SSP con CV de *Gliricidia sepium* en Tacotalpa, Tabasco. Esta diferencia probablemente se deba a una mayor diversidad y tamaño de las especies identificadas en esta investigación (Tabla 1). Mientras que los resultados encontrados en SSP con ADP, además de ser inferiores a lo reportado por Valenzuela-Que *et al.* (2022) (89.28 Mg ha<sup>-1</sup> de C) en SSP con ADP de: *Cordia alliodora*, *Cedrela odorata*, *Ceiba pentandra*, *Citrus sinensis*, *Persea americana*, *Mangifera indica*, *Bursera simaruba*, *Vatairea lundellii*, *Garcinia intermedia* y *Diphysa robinoides* en Tacotalpa, concuerdan con otros estudios (López-Santiago *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2023) quienes señalan que estas diferencias podrían atribuirse a una mayor riqueza, diversidad y densidad de especies arbóreas, y dimensiones de los árboles que aumenta considerablemente el almacenamiento de C.

**Tabla 2. Almacenamiento de carbono (Mg ha<sup>-1</sup> de C) en el componente arbóreo en sistemas silvopastoriles de Centro, Tabasco.**

Reservorios de carbono	Sistemas silvopastoriles	
	ADP	CV
Biomasa aérea	20.77 ± 3.63 <sup>b</sup>	25.77 ± 3.78 <sup>a</sup>
Biomasa raíz	3.71 ± 0.64 <sup>b</sup>	4.75 ± 0.84 <sup>a</sup>

Medias ± error estándar seguidas de literales diferentes entre filas indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

ADP: árboles dispersos en potreros, CV: cercas vivas.

### Propiedades físicas y químicas del suelo en sistemas ganaderos en monocultivo de pastos y sistemas silvopastoriles en Centro, Tabasco.

Los resultados mostraron diferencias significativas para las variables de pH ( $H = 25.78$ ,  $P = 0.0001$ ), DA ( $H = 22.11$ ,  $P = 0.0001$ ), MO ( $H = 8.15$ ,  $P = 0.016$ ), N ( $H = 25.15$ ,  $P = 0.0001$ ) y relación C/N ( $H = 24.24$ ,  $P = 0.0001$ ), mientras que para la variable % C no se encontraron diferencias ( $H = 1.66$ ,  $P = 0.435$ ) (Tabla 3). Los mayores valores de pH en SSP con CV (Tabla 3), probablemente se deban a valores más altos de relación C/N por el proceso de lixiviación de nitratos en suelos con C más lábil (Rowe *et al.*, 2006) favorecida por la mayor riqueza y diversidad de especies arbóreas como ha sido reportado por Vásquez *et al.* (2021). Estos autores reportaron valores de 4.37 y 4.09 en SSP similares a lo encontrado en este estudio, e indican que la presencia del componente arbóreo en estos sistemas juega un papel fundamental en la regulación del pH, atribuido a la descomposición de hojarasca y a otros procesos que ocurren en la matriz del suelo (Polanía-Hincapié *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2021). El mayor contenido de MO en los SSP con ADP y CV con respecto a los sistemas ganaderos en MP (1.24%, 1.27% y 1.02% respectivamente; Tabla 3), se atribuye a la presencia del componente arbóreo. Esto es consistente con lo reportado por Villanueva-López *et al.* (2015) y Poudel *et al.* (2022) quienes señalan que el componente arbóreo en SSP influye considerablemente en el aumento de MO, respecto a los MP, debido a una mayor entrada de hojarasca sobre el suelo y por ende una mayor tasa de descomposición. Vásquez *et al.* (2021) también han reportado mayores contenidos de MO (6.74%) en SSP.

Por otra parte, el contenido de C del suelo ligeramente mayor en SSP con ADP y CV que en MP (Tabla 3), se

atribuyen a la caída de hojarasca, lo que constituye una entrada más de C por su proceso de descomposición y reciclaje de nutrientes en el suelo. Además, puede atribuirse al recambio de raíces finas en los horizontes más profundos debido a la presencia del componente arbóreo, lo que aumenta significativamente el contenido total de C en el suelo, lo cual es consistente a lo reportado por López-Santiago *et al.* (2019) y Morales-Ruiz *et al.* (2021). No obstante, el contenido de C en el suelo también puede variar respecto a la profundidad del suelo y a las prácticas de manejo del mismo, como el arado de la tierra, lo que puede ocasionar una disminución de la MO sobre la capa superior del suelo (Lozano-García y Parras-Alcántara, 2014). Los resultados de este estudio fueron similares a los aportados por Morales-Ruiz *et al.* (2021) y Valenzuela-Que *et al.* (2022), quienes muestran que los SSP con ADP y CV presentan un contenido de C más alto que los MP. Asimismo, coinciden con lo reportado por López-Santiago *et al.* (2019) quienes reportaron que los porcentajes más altos de C también fueron mayores en bosques tropicales (3.7%) que en MP (3.1%). El mayor contenido de N en SSP con ADP y en MP (Tabla 3), el primero pudiera atribuirse a la alta densidad de la especie *H. campechianum*, la cual es una leguminosa que contribuye a mayores existencias de N en el suelo, derivado del proceso de simbiosis con bacterias que forman nódulos en las raíces (Kim y Isaac, 2022). En tanto que, en los MP, probablemente se debió a que esta variable no fue influenciada por procesos que ocurren en la matriz de suelo, esto por efecto de la presencia del componente arbóreo y la descomposición de hojarasca (Tabla 3). Mientras que el menor contenido de N en los SSP con CV probablemente se deba a una menor presencia de leguminosas en la alta riqueza y densidad de especies arbóreas que afectan considerablemente el contenido de N del suelo (Aryal, 2022; Wang *et al.*, 2023).

**Tabla 3. Propiedades físicas y químicas de los suelos en sistemas ganaderos en monocultivo de pastos y sistemas silvopastoriles en Centro, Tabasco.**

Parámetros	Sistemas		
	MP	ADP	CV
pH	4.12 ± 0.04 <sup>b</sup>	4.25 ± 0.09 <sup>b</sup>	4.92 ± 0.12 <sup>a</sup>
DA (g cm <sup>3</sup> )	1.40 ± 0.02 <sup>a</sup>	1.26 ± 0.02 <sup>b</sup>	1.28 ± 0.02 <sup>b</sup>
MO (%)	1.02 ± 0.05 <sup>a</sup>	1.24 ± 0.09 <sup>a</sup>	1.27 ± 0.13 <sup>a</sup>
C (%)	0.59 ± 0.09 <sup>a</sup>	0.72 ± 0.1 <sup>a</sup>	0.73 ± 0.11 <sup>a</sup>
N (%)	0.14 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.14 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.09 ± 0.01 <sup>b</sup>
Relación C/N	3.77 ± 0.35 <sup>c</sup>	5.20 ± 0.5 <sup>b</sup>	7.91 ± 0.6 <sup>a</sup>
Textura	Franco arcillosa	Franco arcillosa	Franco arcillosa

Medias ± error estándar seguidas de literales diferentes entre filas indican diferencias ( $p < 0.05$ ). MP: monocultivo de pastos, ADP: árboles dispersos en potreros, CV: cercas vivas, DA: densidad aparente, MO: materia orgánica, C: carbono, N: nitrógeno.

La relación C/N ligeramente mayor en los SSP con CV y ADP (Tabla 3), podría estar relacionada con la presencia de *H. campechianum* una especie leguminosa característica de la zona de estudio. Esto es consistente con lo reportado por Dawud *et al.* (2016), quien señaló que la relación C/N se ve influenciada por el componente arbóreo. Además, estos mismos autores reportaron que en bosques y suelos forestales con alta diversidad la relación C/N era más alta en las capas inferiores del suelo, atribuido a la presencia del componente arbóreo, por la acción de la deposición de N atmosférico y la fijación de N, más aún cuando las especies son leguminosas. Mientras que, la disminución de la relación C/N del suelo está relacionada con el aumento del contenido de partículas de arcillas debido a la retención y conversión microbiana del C orgánico y la profundidad (Schneider *et al.*, 2021). Cabe destacar que en los bosques y pastizales donde se registran valores de pH del suelo extremadamente ácidos, están fuertemente relacionados con valores bajos de relación C/N debido al proceso de lixiviación de nitratos en suelos con C más lábil (Rowe *et al.*, 2006).

Por último, los valores más altos de DA en los sistemas ganaderos en MP en relación a los SSP con CV y con ADP (1.4, 1.28 y 1.26 g cm<sup>3</sup>, respectivamente; Tabla 3), están relacionados con los menores contenidos de MO, relación C/N, y al suelo (textura franco-arcillosa) con alto contenido de arcilla (Tabla 3) que afectan considerablemente las estimaciones de COS (Villanueva-López *et al.*, 2015; Morales-Ruiz *et al.*, 2021; Valenzuela-Que *et al.*, 2022). Lo anterior, significa que los suelos en los MP son más compactos

que los SSP con CV y ADP. Mientras que los valores más bajos de DA en los SSP con CV y ADP probablemente se debieron a la estrecha relación entre la combinación de árboles y pastos en estos sistemas, marcando un efecto positivo en la reducción de la compactación del suelo en sistemas ganaderos (Polanía-Hincapié *et al.*, 2021) y que la contribución de la descomposición de raíces y de todo el material orgánico depositado sobre el suelo influye considerablemente en valores bajos de DA (Suzuki *et al.*, 2022).

#### Almacenamiento de carbono orgánico del suelo

El almacenamiento de COS hasta los 100 cm de profundidad entre sistemas no presentó diferencias significativas ( $H = 1.64$ ,  $P = 0.440$ ). Sin embargo, se observó que este fue mayor en los SSP con ADP, seguido por aquellos que tenían CV y en MP (Tabla 4). De igual manera, cuando se compara la distribución vertical del COS almacenado entre profundidades tampoco mostró diferencias significativas el MP ( $H = 8.51$ ,  $P = 0.483$ ), ADP ( $H = 13.94$ ,  $P = 0.124$ ) y CV ( $H = 6.98$ ,  $P = 0.639$ ), siguiendo una tendencia de distribución unimodal.

El análisis de correlación entre el COS almacenado y las propiedades físicas y químicas del suelo mostró que en SSP con ADP existe una relación positiva entre las variables DA, MO, N y relación C/N que contribuyen a mejorar las reservas de C en el suelo, y que estas pudieran ser atribuidas a la presencia del componente arbóreo (Tabla 5).

**Tabla 4. Carbono orgánico del suelo a diferentes profundidades en sistemas ganaderos en monocultivo de pastos y sistemas silvopastoriles en Centro, Tabasco.**

Profundidad (cm)	Sistemas (Mg ha <sup>-1</sup> de C)		
	MP	ADP	CV
10	22.66 ± 3.11 <sup>aA</sup>	24.42 ± 0.83 <sup>aA</sup>	24.01 ± 1.89 <sup>aA</sup>
20	23.49 ± 1.81 <sup>aA</sup>	19.49 ± 2.56 <sup>aA</sup>	35.56 ± 9.14 <sup>aA</sup>
30	24.83 ± 2.13 <sup>aA</sup>	27.87 ± 6.72 <sup>aA</sup>	31.42 ± 4.16 <sup>aA</sup>
40	28.8 ± 2.19 <sup>aA</sup>	40.98 ± 16.44 <sup>aA</sup>	35.01 ± 6.74 <sup>aA</sup>
50	34.93 ± 11.16 <sup>aA</sup>	39.91 ± 15.4 <sup>aA</sup>	40.48 ± 4.47 <sup>aA</sup>
60	27.36 ± 3.15 <sup>aA</sup>	29.36 ± 3.02 <sup>aA</sup>	35.66 ± 3.03 <sup>aA</sup>
70	35.95 ± 5.3 <sup>aA</sup>	41.78 ± 10.6 <sup>aA</sup>	37.31 ± 6.53 <sup>aA</sup>
80	35.33 ± 11.35 <sup>aA</sup>	55.25 ± 11.73 <sup>aA</sup>	37.65 ± 4.47 <sup>aA</sup>
90	44.01 ± 10.5 <sup>aA</sup>	40.29 ± 2.67 <sup>aA</sup>	27.86 ± 10.73 <sup>aA</sup>
100	35.13 ± 15.59 <sup>aA</sup>	43.17 ± 5.04 <sup>aA</sup>	27.09 ± 13.96 <sup>aA</sup>
<b>Σ COS a 100 cm</b>	<b>312.49<sup>a</sup></b>	<b>362.52<sup>a</sup></b>	<b>332.05<sup>a</sup></b>

Medias ± error estándar seguidas de literales minúsculas entre filas no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). Medias ± error estándar seguidas de literales mayúsculas similares no son estadísticamente diferentes entre profundidades (columnas). COS: Carbono orgánico del suelo; MP: monocultivo de pastos, ADP: árboles dispersos en potreros, CV: cercas vivas.

**Tabla 5. Coeficientes de correlación de Spearman entre el COS y las propiedades físicas y químicas del suelo en sistemas ganaderos en monocultivo de pastos y sistemas silvopastoriles en Centro, Tabasco.**

Sistema	Variables	Coefficiente de correlación (rho)	P-valor
Monocultivo de pastos	pH	0.238	0.206 NS
	DA	-0.023	0.905 NS
	%MO	0.338	0.068 NS
	%C	0.075	0.695 NS
	%N	0.072	0.707 NS
	Relación C/N	0.035	0.854 NS
Árboles dispersos en potreros	pH	0.075	0.692 NS
	DA	0.520	0.003*
	%MO	-0.536	0.002*
	%C	0.010	0.960 NS
	%N	0.328	0.077 NS
	Relación C/N	-0.403	0.027*
Cercas vivas	pH	-0.327	0.078 NS
	DA	0.087	0.649 NS
	%MO	0.148	0.435 NS
	%C	0.126	0.507 NS
	%N	0.004	0.983 NS
	Relación C/N	0.226	0.229 NS

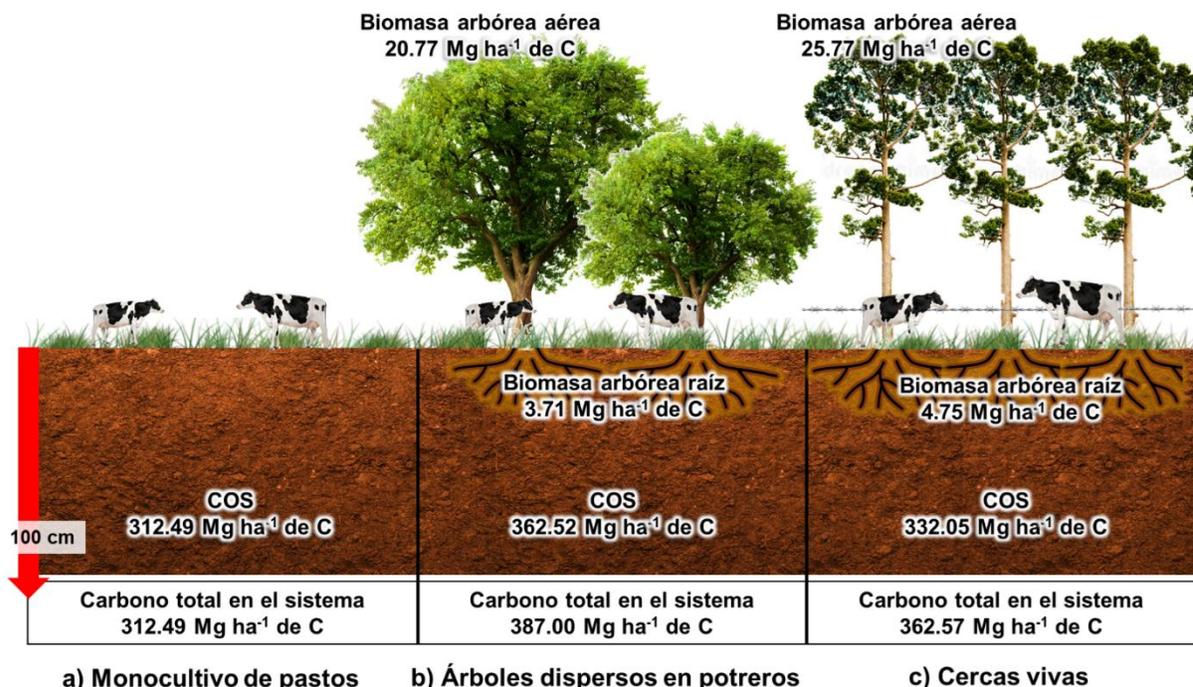
\*Significativa (<0.05), NS: No significativas. DA: densidad aparente, MO: materia orgánica, C: carbono, N: nitrógeno.

A pesar de que los tres sistemas evaluados no presentaron diferencias significativas en el almacenamiento de COS (Tabla 4), los resultados son mayores a los aportados por Valenzuela-Que *et al.* (2022), quienes reportaron valores de 257.45 Mg ha<sup>-1</sup> de C a 30 cm de profundidad en SSP con ADP. Del mismo modo, los valores obtenidos en SSP con CV y en MP (332.05 y 312.49 Mg ha<sup>-1</sup> de C, respectivamente; Tabla 4) son tres veces mayores que los reportados por Villanueva-López *et al.* (2015) (107 Mg ha<sup>-1</sup> de C) en SSP con CV constituidas por árboles de *G. sepium* asociadas con pasto *Brachiaria decumbens* y en MP (119 Mg ha<sup>-1</sup> de C) en esta misma región tropical. Asimismo, son mayores a lo reportado por López-Santiago *et al.*, (2019) (73.4 Mg ha<sup>-1</sup> de C) en MP en Michoacán. Estas diferencias podrían atribuirse a una mayor profundidad de muestreo, en nuestro estudio los muestreos se realizaron hasta 100 cm de profundidad, mientras que en los estudios antes mencionados la profundidad de muestreo fue hasta los 30 cm. Nuestros hallazgos son consistentes con lo reportado por Cardinael *et al.* (2017); Guzmán-Camposeco *et al.* (2021) y Ferreiro-Domínguez *et al.* (2022) quienes encontraron mayor almacenamiento de COS cuando los sitios son evaluados hasta los 100 cm de profundidad; lo cual también depende de las prácticas de manejo, uso y tipo de suelo y de la diversidad de especies arbóreas del sistema. Asimismo, Osei *et al.* (2017) señalan que la distribución del COS en las capas más profundas del suelo (después de los 40 – 50 cm) es influenciada por el tipo de vegetación sobre el suelo. Villanueva-López *et al.* (2015); Beckert *et al.* (2016); Osei *et al.* (2017) y Aryal *et al.* (2019) señalan que los SSP tienen un gran

potencial de secuestro de C en comparación con los MP debido a que en estos sistemas existen dos impulsores principales que propician el almacenamiento de COS y que se relacionan con la presencia del componente arbóreo: el aporte de C de las raíces de los árboles y la caída de la hojarasca. Según estos autores, en los SSP existe una mayor presencia de MO en comparación con los MP debido a que los árboles tienen un sistema radical más grande y grueso y que con facilidad logran alcanzar una mayor profundidad incorporando material orgánico al suelo. Otros estudios también han evidenciado que los suelos vertisoles como los encontrados en nuestra área de estudio, tienen una alta capacidad de almacenar COS debido al contenido y tipo de arcillas predominante y el tamaño de las partículas (limo y arcilla) propician una mayor acumulación de COS en las capas más profundas del suelo y que mientras aumenta el contenido de arcilla, aumenta la capacidad de almacenar COS (Mathieu *et al.*, 2015; Beckert *et al.*, 2016). Además, se detecta la capacidad de tener un C más estable por largos periodos, debido a las características de las partículas y sus macro agregados, ideales para contribuir a mitigar el cambio climático (Lakaria *et al.*, 2012; Ayala-Montejo *et al.*, 2020; Mendoza-Vega *et al.*, 2021; Choudhury, 2023).

#### **Almacenamiento de C total en sistemas ganaderos en monocultivo de pastos y sistemas silvopastoriles**

Los resultados muestran que el SSP con ADP acumuló el mayor contenido de C total, seguido del SSP con CV y el sistema ganadero en MP (Figura 3b). Cabe destacar que el suelo contribuyó con el 93.67% y 91.58% del C



**Figura 3.** Almacenamiento de carbono total (Mg ha<sup>-1</sup> de C) en sistemas ganaderos en monocultivo de pastos y sistemas silvopastoriles. COS: Carbono orgánico del suelo (Elaboración propia).

total almacenado en el sistema para los SSP con ADP y CV respectivamente, y la biomasa del componente arbóreo con 6.33% y 8.42% en ADP y CV respectivamente (Figuras 3b y 3c), mientras que para los MP el suelo representó el único reservorio (Figura 3a).

El que los sistemas ganaderos en MP hayan almacenado menor cantidad de C total (Figura 3a) se atribuye a la falta del componente arbóreo, siendo el reservorio suelo el único componente que aportó C al sistema. También puede deberse a los valores más bajos de pH y MO, a quienes se les atribuye que favorecen el almacenamiento de COS. Esto demuestra la importancia de los árboles en mejorar la salud de los suelos para mitigar y adaptar al CC. Mientras que en los SSP con ADP y CV la biomasa del componente arbóreo aportaron el 6.33% y 8.42% respectivamente. Esto indica que el COS representa en los SSP con ADP y CV el 93.67 y 91.58% respectivamente del C total acumulado en el sistema (Figura 3b y 3c). Estos resultados son similares a lo reportado por Villanueva-López *et al.* (2015) y Aryal *et al.* (2019) quienes en SSP en Tabasco, y Chiapas encontraron que el reservorio suelo aporta el más del 90% del total de C, mientras que la biomasa aporta el 6.7%. El análisis de correlación entre el COS almacenado y las propiedades físicas y químicas del suelo mostró que en los SSP con ADP existe una relación positiva entre las variables DA, MO, N y relación C/N que contribuyen a mejorar las reservas de C en el suelo, y que estas pudieran ser

atribuidas a la presencia del componente arbóreo (Tabla 5). La mayor cantidad de C almacenado en los SSP con ADP y CV, es debido a la presencia del componente arbóreo y a la caída de hojarasca, que contribuyen a un mejor contenido de C en el suelo (Villanueva-López *et al.*, 2015; Valenzuela Que *et al.*, 2022). Al respecto, Aryal *et al.* (2019) señalan que el almacenamiento de C a nivel de sistema llega a ser de hasta 144.45 Mg ha<sup>-1</sup> de C cuando existe una mayor diversidad y densidad de árboles. Otros estudios en SSP y remanentes de bosques tropicales de Michoacán, alcanzan valores altos (120.7 y 120.9 Mg ha<sup>-1</sup> de C, respectivamente) en comparación con los alcanzados en MP (78.2 Mg ha<sup>-1</sup> de C) (López-Santiago *et al.*, 2019). Nuestros hallazgos y los diversos estudios citados sugieren que la combinación entre el componente arbóreo y los forrajes en SSP es una vía prometedora respecto a los almacenes de C en los sistemas ganaderos, además de favorecer la preservación de la biodiversidad. Por ello, es importante promover con los productores ganaderos la importancia de adoptar SSP que, de manera conjunta con el uso y manejo de la tierra, sean una estrategia para el desarrollo de una ganadería sostenible, resiliente, competitiva y de bajas emisiones, además de proveer de bienes y servicios que, a mediano plazo, eleven la calidad de vida.

## CONCLUSIONES

Los SSP con ADP almacenaron la mayor cantidad de C seguido de las CV comparado con los MP. La mayor cantidad de C se almacenó en el suelo, seguido del componente arbóreo. En el componente arbóreo, la mayor cantidad de C logra acumularse en la biomasa aérea y, en menor medida en la raíz. Además, del aporte sustancial de la diversidad de especies en el almacenamiento de C total en el sistema, este también estuvo fuertemente influenciado por el tipo de suelo vertisol, probablemente por su alto contenido de arcillas que muestran una alta capacidad para almacenar COS en sistemas ganaderos del trópico húmedo. Asimismo, la profundidad de muestreo del suelo hasta los 100 cm fue un factor que permitió la determinación del almacenamiento de C en un gran espesor del suelo. La mayor profundidad del suelo, manifestada por la presencia de COS en profundidad, está directamente relacionada con el contenido de arcillas, lo que favoreció una mayor acumulación de C. Finalmente, las propiedades físicas y químicas del suelo fueron mejores en los SSP con ADP y CV atribuido a la presencia del componente arbóreo que mejoraron considerablemente el pH, DA, MO y el contenido de C. Particularmente, el mayor aporte de N en ADP se debió a la dominancia de *H. campechianum*, una especie leguminosa, que fija cantidades significativas de N al suelo. Esto refuerza la necesidad de implementar prácticas silvopastoriles en sistemas ganaderos basados en el MP, como la inclusión de leguminosas y especies de gramíneas que propicien una mejora del almacenamiento de C. Los resultados de este estudio tienen implicaciones fundamentales en la mitigación de cambio climático a través de captura de carbono en paisajes ganaderos con la implementación de sistemas silvopastoriles.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada al primer autor con número de apoyo 788842, durante sus estudios de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural en El Colegio de la Frontera Sur; al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Tabasco por los recursos económicos del proyecto PRODECTI-2022-01/21, al Laboratorio de Estudios Avanzados en Agroecosistemas del TecNM campus IT Zona Maya, y a ECOSUR por la infraestructura para llevar a cabo este proyecto.

**Funding.** This research was funded by CONAHCYT through a master's scholarship, and Council of Science and Technology of the State of Tabasco for the

economic resources of the PRODECTI-2022-01/21 project.

**Conflict of interest.** The authors declare that there is no conflict of interest regarding this manuscript.

**Compliance with ethical standards.** The authors declare that they have complied with national and international standards or research, data collection and analysis and the research present original data that has not been sent to another journal. Likewise, it is reported that the producers received a satisfactory explanation about the study procedures and its purpose and their participation was voluntary.

**Data availability.** The data is available through the corresponding author: gvillanueva@ecosur.mx, reasonable request.

**Author contribution statement (CRediT).** **C.A. De la Cruz López:** Conceptualization, data curation, formal analysis, methodology and writing – original draft. **G. Villanueva-López:** Conceptualization, investigation, methodology, supervision, validation, writing - original draft and writing review and editing. **F. Casanova-Lugo:** Conceptualization, investigation, methodology, supervision, validation, writing - original draft and writing review and editing. **P. Martínez-Zurimendi:** Conceptualization, investigation, methodology, supervision, validation, writing - original draft and writing review and editing. **D. R. Aryal:** Data curation, supervision, validation, writing - original draft and writing review and editing.

## REFERENCIAS

- Aryal, D.R., 2022. Grazing intensity in grassland ecosystems: implications for carbon storage and functional properties. *CABI Reviews*, 2022. <https://doi.org/10.1079/cabireviews202217032>.
- Aryal, D.R., Gómez-González, R.R., Hernández-Nuriasmi, R. and Morales-Ruiz, D.E., 2019. Carbon stocks and tree diversity in scattered tree silvopastoral systems in Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems*, 93(1), pp. 213–227. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0310-y>.
- Ayala-Montejo, D., Monterroso Rivas, A.I., Baca Del Moral, J., Escamilla Prado, E., Sánchez Hernández, R., Pérez Nieto, J., Rajagopal, I., Alegre Orihuela, J.C. and Valdes Velarde, E., 2020. Identificación de necesidades de investigación sobre la dinámica de carbono y nitrógeno en sistemas agroforestales de café en México. *Tropical and Subtropical*

- Agroecosystems*, 23, p. 99. <https://doi.org/10.56369/tsaes.3403>.
- Beckert, M.R., Smith, P., Lilly, A. and Chapman, S.J., 2016. Soil and tree biomass carbon sequestration potential of silvopastoral and woodland-pasture systems in North East Scotland. *Agroforestry Systems*, 90(3), pp. 371–383. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9860-4>.
- Brown, S., 2002. Measuring carbon in forests: Current status and future challenges. *Environmental Pollution*, 116(3), pp. 363–372. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00212-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00212-3).
- Cairns, M.A., Brown, S., Helmer, E.H. and Baumgardner, G.A., 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111(1), pp. 1–11. <https://doi.org/10.1007/s004420050201>.
- Cárdenas, A., Moliner, A., Hontoria, C. and Ibrahim, M., 2019. Ecological structure and carbon storage in traditional silvopastoral systems in Nicaragua. *Agroforestry Systems*, 93(1), pp. 229–239. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0234-6>.
- Cardinael, R., Chevallier, T., Cambou, A., Béral, C., Barthès, B.G., Dupraz, C., Durand, C., Kouakoua, E. and Chenu, C., 2017. Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 236, pp. 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.011>.
- Caro, D., Davis, S.J., Bastianoni, S. and Caldeira, K., 2014. Global and regional trends in greenhouse gas emissions from livestock. *Climatic Change*, 126(1–2), pp. 203–216. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1197-x>.
- Chatterjee, N., Nair, P.K.R., Nair, V.D., Viswanath, S. and Bhattacharjee, A., 2020. Depth-wise distribution of soil-carbon stock in aggregate-sized fractions under shaded-perennial agroforestry systems in the Western Ghats of Karnataka, India. *Agroforestry Systems*, 94(2), pp. 341–358. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00399-z>.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M.S., Delitti, W.B.C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P.M., Goodman, R.C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W.A., Muller-Landau, H.C., Mencuccini, M., Nelson, B.W., Ngomanda, A., Nogueira, E.M., Ortiz-Malavassi, E., Péliissier, R., Ploton, P., Ryan, C.M., Saldarriaga, J.G. and Vieilledent, G., 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), pp. 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>.
- Choudhury, B.U., 2023. Controls on vertical distribution of organic carbon in the intermontane valley soils (Barak, Northeast India). *Soil and Tillage Research*, 225, p.105532. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105532>.
- Dawud, S.M., Raulund-Rasmussen, K., Domisch, T., Finér, L., Jaroszewicz, B. and Vesterdal, L., 2016. Is Tree Species Diversity or Species Identity the More Important Driver of Soil Carbon Stocks, C/N Ratio, and pH? *Ecosystems*, 19(4), pp. 645–660. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-9958-1>.
- De la Cruz López, C.A., Ramos Arcos, S.A. and López Martínez, S., 2018. Efecto de la adición de ácidos orgánicos sobre la bioacumulación de Plomo, Talio y Vanadio en *Chrysopogon zizanioides* creciendo sobre suelos contaminados de un relleno sanitario. *Nova Scientia*, 10(21), pp. 403–422. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i21.1582>.
- Ferreiro-Domínguez, N., Palma, J.H.N., Paulo, J.A., Rigueiro-Rodríguez, A. and Mosquera-Losada, M.R., 2022. Assessment of soil carbon storage in three land use types of a semi-arid ecosystem in South Portugal. *Catena*, 213(March), p. 106196. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106196>.
- Guzmán-Camposco, F., Aguirre-Medina, J.F., Villalobos-Villalobos, V., Espinosa-Zaragoza, S. and Aguirre-Cadena, J.F., 2021. Estimación de biomasa y carbono en *elaeis guineensis* jacq. En dos suelos contrastantes de la planicie costera de chiapas. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24, p. 12. <https://doi.org/10.56369/tsaes.3390>.
- Havlík, P., Valin, H., Herrero, M., Obersteiner, M., Schmid, E., Rufino, M.C., Mosnier, A., Thornton, P.K., Böttcher, H., Conant, R.T., Frank, S., Fritz, S., Fuss, S., Kraxner, F. and Notenbaert, A., 2014. Climate change mitigation through livestock system transitions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(10), pp. 3709–

3714.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1308044111>.
- Houghton, R.A. and Nassikas, A.A., 2017. Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850-2015. *Global Biogeochemical Cycles*, 31(3), pp. 456–472.  
<https://doi.org/10.1002/2016GB005546>.
- Kim, D.-G. and Isaac, M.E., 2022. Nitrogen dynamics in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(4), p. 60.  
<https://doi.org/10.1007/s13593-022-00791-7>.
- Laborde, D., Mamun, A., Martin, W., Piñeiro, V. and Vos, R., 2021. Agricultural subsidies and global greenhouse gas emissions. *Nature Communications*, 12(1), p. 2601.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-22703-1>.
- Lakaria, B.L., Singh, M., Sammi Reddy, K., Biswas, A.K., Jha, P., Chaudhary, R.S., Singh, A.B. and Subba Rao, A., 2012. Carbon Addition and Storage Under Integrated Nutrient Management in Soybean–Wheat Cropping Sequence in a Vertisol of Central India. *National Academy Science Letters*, 35(3), pp. 131–137.  
<https://doi.org/10.1007/s40009-012-0040-z>.
- Lemes, A.P., Garcia, A.R., Pezzopane, J.R.M., Brandão, F.Z., Watanabe, Y.F., Cooke, R.F., Sponchiado, M., de Paz, C.C.P., Camplesi, A.C., Binelli, M. and Gimenes, L.U., 2021. Silvopastoral system is an alternative to improve animal welfare and productive performance in meat production systems. *Scientific Reports*, 11(1), p. 14092.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-93609-7>.
- López-Santiago, J.G., Casanova-Lugo, F., Villanueva-López, G., Díaz-Echeverría, V.F., Solorio-Sánchez, F.J., Martínez-Zurimendi, P., Aryal, D.R. and Chay-Canul, A.J., 2019. Carbon storage in a silvopastoral system compared to that in a deciduous dry forest in Michoacán, Mexico. *Agroforestry Systems*, 93(1), pp. 199–211.  
<https://doi.org/10.1007/s10457-018-0259-x>.
- Lozano-García, B. and Parras-Alcántara, L., 2014. Variation in soil organic carbon and nitrogen stocks along a toposequence in a traditional mediterranean olive grove. *Land Degradation & Development*, 25(3), pp. 297–304.  
<https://doi.org/10.1002/ldr.2284>.
- Mathieu, J.A., Hatté, C., Balesdent, J. and Parent, É., 2015. Deep soil carbon dynamics are driven more by soil type than by climate: a worldwide meta-analysis of radiocarbon profiles. *Global Change Biology*, 21(11), pp. 4278–4292.  
<https://doi.org/10.1111/gcb.13012>.
- Mendoza-Vega, J., Messing, I., Ku-Quej, V.M., Pool-Novelo, L. and Chi-Quej, J., 2021. Land evaluation and carbon flux estimation to reinforce natural protected areas: a case study in Southern Mexico. *Environmental Earth Sciences*, [online] 80(3), p.7–8.  
<https://doi.org/10.1007/s12665-021-09369-0>.
- Morales-Ruiz, D.E., Aryal, D.R., Pinto-Ruiz, R., Guevara-Hernández, F., Casanov-Lugo, F. and Villanueva-López, G., 2021. Carbon contents and fine root production in tropical silvopastoral systems. *Land Degradation and Development*, 32(2), pp. 738–756.  
<https://doi.org/10.1002/ldr.3761>.
- Osei, A.K., Kimaro, A.A., Peak, D., Gillespie, A.W. and Van Rees, K.C.J., 2017. Soil carbon stocks in planted woodlots and Ngitili systems in Shinyanga, Tanzania. *Agroforestry Systems*, 92, pp. 251–262.  
<https://doi.org/10.1007/s10457-016-0028-7>.
- Palma-López, D.J., Jiménez Ramírez, R., Zavala-Cruz, J., Bautista-Zúñiga, F., Gavi Reyes, F. and Palma-Cancino, D.Y., 2017. Actualización de la clasificación de suelos de Tabasco, México. *Agroproductividad*, 10(12), pp. 29–35.
- Polanía-Hincapié, K.L., Olaya-Montes, A., Cherubin, M.R., Herrera-Valencia, W., Ortiz-Morea, F.A. and Silva-Olaya, A.M., 2021. Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. *Geoderma*, 386, pp. 1–10.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114900>.
- Poudel, S., Bansal, S., Podder, S., Paneru, B., Karki, S., Fike, J. and Kumar, S., 2022. Conversion of open pasture to hardwood silvopasture enhanced soil health of an ultisol. *Agroforestry Systems*. 96, pp. 1237–1247. [online] <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00783-2>.
- Rowe, E.C., Evans, C.D., Emmett, B.A., Reynolds, B., Helliwell, R.C., Coull, M.C. and Curtis, C.J., 2006. Vegetation Type Affects the Relationship Between Soil Carbon to Nitrogen Ratio and Nitrogen Leaching. *Water, Air, and Soil Pollution*, [online] 177(1–4), pp. 335–347.

- <https://doi.org/10.1007/s11270-006-9177-z>.
- Sales-Baptista, E. and Ferraz-de-Oliveira, M.I., 2021. Grazing in silvopastoral systems: multiple solutions for diversified benefits. *Agroforestry Systems*, 95(1), pp. 1–6. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00581-8>.
- Schneider, F., Amelung, W. and Don, A., 2021. Origin of carbon in agricultural soil profiles deduced from depth gradients of C:N ratios, carbon fractions,  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values. *Plant and Soil*, [online] 460(1–2), pp. 123–148. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04769-w>.
- Steinfeld, H. and Wassenaar, T., 2007. The Role of Livestock Production in Carbon and Nitrogen Cycles. *Annual Review of Environment and Resources*, 32(1), pp. 271–294. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.32.041806.143508>.
- Suzuki, L.E.A.S., Reinert, D.J., Fenner, P.T., Secco, D. and Reichert, J.M., 2022. Prevention of additional compaction in eucalyptus and pasture land uses, considering soil moisture and bulk density. *Journal of South American Earth Sciences*, 120, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104113>.
- Valenzuela-Que, F.G., Villanueva-López, G., Alcudia-Aguilar, A., Medrano-Pérez, O.R., Cámara-Cabrales, L., Martínez-Zurimendi, P., Casanova-Lugo, F. and Aryal, D.R., 2022. Silvopastoral systems improve carbon stocks at livestock ranches in Tabasco, Mexico. *Soil Use and Management*, 38(2), pp.1237–1249. <https://doi.org/10.1111/sum.12799>.
- Vásquez, H. V., Valqui, L., Bobadilla, L.G., Arbizu, C.I., Alegre, J.C. and Maicelo, J.L., 2021. Influence of arboreal components on the physical-chemical characteristics of the soil under four silvopastoral systems in northeastern Peru. *Heliyon*, [online] 7(8), pp 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07725>.
- Villanueva-López, G., Lara-Pérez, L.A., Oros-Ortega, I., Ramírez-Barajas, P.J., Casanova-Lugo, F., Ramos-Reyes, R. and Aryal, D.R., 2019. Diversity of soil macro-arthropods correlates to the richness of plant species in traditional agroforestry systems in the humid tropics of Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 286, pp.1–8. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106658>.
- Villanueva-López, G., Martínez-Zurimendi, P., Casanova-Lugo, F., Ramírez-Avilés, L. and Montañez-Escalante, P.I., 2015. Carbon storage in livestock systems with and without live fences of *Gliricidia sepium* in the humid tropics of Mexico. *Agroforestry Systems*, 89(6), pp. 1083–1096. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9836-4>.
- Wang, C., Li, X., Hu, Y., Zheng, R. and Hou, Y., 2023. Nitrogen addition weakens the biodiversity multifunctionality relationships across soil profiles in a grassland assemblage. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 342, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108241>.
- Xu, T., Zhang, M., Ding, S., Liu, B., Chang, Q., Zhao, X., Wang, Y., Wang, J. and Wang, L., 2021. Grassland degradation with saline-alkaline reduces more soil inorganic carbon than soil organic carbon storage. *Ecological Indicators*, 131, pp.1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108194>.
- Zanne, A.E., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, D.A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S.L., Miller, R.B., Swenson, N.G., Wiemann, M.C. and Chave, J., 2009. Global Wood Density Database. *Dryad Digital Repository*. *Dryad, Dataset*. <https://doi.org/10.5061/dryad.234>.