

## Carbono estructural y compartimentos en bosques certificados por el Forest Stewardship Council, en Oaxaca, México

### Structural Carbon and Compartments in Forests Certified by the Forest Stewardship Council, in Oaxaca, Mexico

Pablo Espinoza-Zúñiga<sup>1\*</sup> ,  
Juan Antonio Leos-Rodríguez<sup>1</sup> ,  
Gerardo Rodríguez-Ortiz<sup>2</sup> ,  
Blanca Margarita Montiel-Batalla<sup>3</sup> ,  
Ramon Valdivia-Alcalá<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>División de Ciencias Económico Administrativas, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco Km 38.5, Texcoco, Estado de México, México.

<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, Xoxocotlán, CP. 71230. Oaxaca, Oaxaca, México.

<sup>3</sup>Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California, Nuevo León, CP. 21705, Mexicali, Baja California, México.

\*Autor de correspondencia:  
jaret\_es\_zu@hotmail.com

#### Artículo científico

Recibido: 07 de septiembre 2022

Aceptado: 09 de marzo 2023

**Como citar:** Espinoza-Zúñiga P, Leos-Rodríguez JA, Rodríguez-Ortiz G, Martínez-Cruz AL, Montiel-Batalla BM, Valdivia-Alcalá R (2023) Carbono estructural y compartimentos en bosques certificados por el Forest Stewardship Council, en Oaxaca, México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 10(1): e3474. DOI: 10.19136/era.a10n1.3474

**RESUMEN.** Este estudio compara la cantidad de carbono (C) estructural y de compartimiento aéreo versus C de suelo bajo dos tratamientos silvícolas (TS) aclareo y cortas de regeneración. Las mediciones se realizaron en 2021 en sitios de muestreo (SM) localizados en Oaxaca, México, correspondientes a una comunidad certificada en prácticas de manejo forestal por el Forest Stewardship Council, y a una comunidad forestal no certificada. Se realizaron análisis de varianza y pruebas de medias bajo diseño completamente aleatorio con arreglo factorial y, análisis clúster de los SM. No se documentan diferencias por comunidad o TS por sí mismos, pero la interacción entre comunidad y TS generó efectos altamente significativos ( $p \leq 0.01$ ), de tal manera que los SM en la comunidad certificada presentaron mayores montos de C en los compartimentos evaluados. El TS aclareo en SM de la comunidad certificada generó en árboles y piso forestal mayor contenido de C que en SM de la comunidad sin certificación (334 y 24%, respectivamente). Los SM con cortas de regeneración, certificados o no, incrementan en 120.2% el C, al incorporar el piso forestal los montos almacenados en el C fijado en el árbol. No hubo diferencias en el C almacenado en piso forestal entre comunidades (165.97 tC ha<sup>-1</sup>), independiente del TS que se aplique. Los resultados son de utilidad para la toma de decisiones por los diseñadores de políticas públicas orientadas a mejorar el manejo forestal, las cuales tienen influencia en los montos de C almacenados en el ecosistema.

**Palabras clave:** Biomasa aérea, bosques comunitarios, piso forestal, prácticas forestales, tratamientos silvícolas.

**ABSTRACT.** This study compares the amount of structural and aboveground carbon (C) versus soil C under two silvicultural treatments (ST) - thinning and regeneration cut. Measurements were made in 2021 at sampling sites (SS) located in Oaxaca, Mexico, corresponding to a community certified in forest management practices by the Forest Stewardship Council, versus a non-certified forest community. Analysis of variance and tests of means were performed under a completely randomized design with factorial arrangement and cluster analysis of the SS. No differences by community or ST by themselves are documented, but the interaction between community and ST generated highly significant effects ( $p \leq 0.01$ ), in such a way that the SS in the certified community presented higher amounts of C in the evaluated compartments. The ST thinning in SS of the certified community generated higher C content in trees and forest floor than in SS of the community without certification (334% and 24%, respectively). The SS with regeneration cuts, certified or not, increase C by 120.2%, by incorporating the amounts stored in the C fixed in the tree into the forest floor. There were no differences in the C stored in the forest floor between communities (165.97 tC ha<sup>-1</sup>), regardless of the ST applied. The results are useful for decision-making by designers of public policies aimed at improving forest management, which have an influence on the amounts of C stored in the ecosystem.

**Key words:** Aboveground biomass, community forests, forest floor, forest practices, silvicultural treatments.

## INTRODUCCIÓN

Los bosques proveen múltiples servicios ecosistémicos, como el secuestro de carbono, el ciclo del agua, el hábitat para la fauna silvestre, entre otros (Gardner *et al.* 2009). Grandes extensiones de estos ecosistemas se han degradado por actividades antropogénicas, al tiempo que la demanda de productos forestales va en aumento, generando problemas ambientales, como la erosión del suelo, pérdida de la biodiversidad y la emisión masiva de CO<sub>2</sub> (Damette y Delacote 2011). Hace más de dos décadas surgió el Forest Stewardship Council (FSC) motivado principalmente por Organizaciones no Gubernamentales (ONG), pueblos indígenas y otras partes interesadas, para promover mejores prácticas de gestión forestal (Auld *et al.* 2008), así como para hacer frente a los problemas de deforestación y degradación de bosques y selvas (Rametsteiner y Simula 2003).

El FSC centra sus objetivos en aspectos ambientales, sociales y económicos, así como en contribuir en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> con la aplicación de mejores prácticas de gestión forestal (Nath-Oli y Shrestha 2009, Putz *et al.* 2008). El FSC ha venido recompensando las buenas prácticas forestales, las cuales tienen como consecuencia la preservación de los servicios ecosistémicos, incluidos el secuestro carbono (Charmakar *et al.* 2021). Pettenella y Brotto (2012) mencionan que el FSC puede ser una condición previa para el éxito de la venta de carbono en los mercados nacionales e internacionales.

El calentamiento global amenaza la continua provisión de los servicios ecosistémicos (Lamsal *et al.* 2017). El acuerdo de París enfatiza la búsqueda de soluciones que contrarresten los efectos del cambio climático (Charmakar *et al.* 2021). Los bosques son una solución efectiva para lograr esto. De acuerdo con datos de Federici *et al.* (2015) los bosques, fijan alrededor de 2.52 Gt de carbono por año.

La investigación sobre contenidos de carbono se enfoca principalmente en biomasa o materia seca, esto permite conocer el funcionamiento, estructura y dinámica del carbono fijado en el árbol. Sin embargo, es necesario incluir en estos estudios el car-

bono almacenado en otras estructuras y compartimentos como el piso forestal, ya que es ahí donde se fijan grandes cantidades de carbono mediante la incorporación de biomasa procedente de la abscisión de las plantas (Chávez-Pascual *et al.* 2013, Chávez-Pascual *et al.* 2017, Schulp *et al.* 2008).

A pesar de que en México se han realizado estudios que miden los contenidos de C, no hay evidencia sobre si las actividades de manejo forestal bajo el enfoque de la certificación forestal del FSC tienen influencia sobre los montos de C almacenados en la estructura arbórea y piso forestal. Al respecto, Cortés-Pérez *et al.* (2021) cuantifican los contenidos de C en la biomasa aérea de bosques templados de Oaxaca considerando tres sistemas silvícolas y concluyen que los bosques manejados con el método mexicano de ordenación de bosques irregulares (MMOBI) tienen mayor potencial para almacenar C respecto al método de desarrollo silvícola (MDS). Por otro lado, Leyva-Pablo *et al.* (2021) midieron el efecto de dos manejos silvícolas, después de 21 años de reforestación, sobre el secuestro de C en el suelo, encontraron que el MMOBI favorece los almacenes de C en el suelo. Mientras que, Monárrez-González *et al.* (2018) evaluaron el efecto del manejo forestal en bosques templados de México sobre los montos de C, encontrando que las prácticas de gestión forestal favorecen el abastecimiento de madera y las reservas de C. Mientras que Ríos-Camey *et al.* (2021) mediante el ajuste de modelos de crecimiento cuantificaron incremento en biomasa y C en bosques de *Pinus teocote* y *P. oocarpa* en Guerrero, mencionan que los modelos de crecimiento son eficientes para estimar e inferir la captura de C con base en la técnica de análisis troncal. Por otro lado, Ordóñez Díaz *et al.* (2014) realizaron dos estimaciones, conservadora y real del contenido de C en la biomasa de bosques conservados y bajo manejo en el estado de Michoacán, concluyendo que el área de estudio tiene potencial para participar en proyectos de bonos de carbono. El manejo forestal tiene un papel importante en la concentración de biomasa en los bosques bajo aprovechamiento (Chávez-Pascual *et al.* 2017), por su parte el FSC promueve mejores prácticas de gestión forestal para garantizar la conservación y/o

restauración de los servicios ecosistémicos. Estas prácticas de gestión tienen repercusiones directas en la fijación de carbono en el piso forestal, el cual no es considerado en el mercado de los bonos de carbono.

San Pedro el Alto, es una comunidad del estado de Oaxaca, que tiene casi dos décadas con la certificación de su manejo forestal con el FSC, implementando tratamientos silvícolas y complementarios que permitan la continua provisión de los servicios ecosistémicos, incluidos el secuestro de carbono, por lo que es necesario medir el efecto de la implementación de las buenas prácticas forestales promovidas por el FSC para determinar el efecto para ver si estas han tenido un efecto en la concentración de carbono en biomasa estructural y subterránea (Serrano-Ramírez *et al.* 2022). Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue estimar los montos de C contenidos en estructuras, compartimentos y suelo en función de tratamientos silvícolas y la certificación de FSC en comunidades forestales del sur de México; con la hipótesis de que incluyendo el carbono secuestrado en todo el ecosistema se puede tener un incremento mínimo del 100%.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Antecedentes del área de estudio

En el 2021, para elegir las comunidades que participarían en el estudio se construyó una matriz de selección que contenía las siguientes variables: Sistema y tratamiento silvícola, ciclo y turno de corta, incremento medio y corriente anual, tipo de propiedad y tamaño del aprovechamiento. Seleccionando las localidades de San Pedro el Alto (con manejo forestal certificado) y San Juan Atepec (sin certificación), localizadas al sur y al norte del estado de Oaxaca, México. La localidad con FSC tiene desde hace más de dos décadas la certificación de su manejo forestal y la localidad sin certificación opera su gestión forestal sin certificación alguna. Se establecieron 12 sitios de muestreo (SM) de 400 m<sup>2</sup> en las dos comunidades, las cuales presentaron condiciones homogéneas de estructura residual. Los SM tienen una altitud promedio de 2 650 m, con pendientes entre 20 y 60% (Figura 1).

Los SM fueron delimitados circularmente con la ayuda de un GPS (*global positioning system*) (Garmin eTrex 30, USA). Se estructuró un formato inventario para arbolado, en el cual, en cada SM se tomaron los diámetros normales (DN, cm) mayores iguales de 7.5 cm con la ayuda de una cinta diamétrica (Forestry Suppliers 283d), altura total (AT, m) con la ayuda de un clinómetro electrónico (Haglöf ECII D) y la edad (E) obtenida con una barrena forestal (REF: BS400 a BS405), así como también, se fueron registrando las especies de los árboles.

Con la finalidad de homogeneizar las intervenciones de manejo forestal en ambas muestras, se seleccionaron dos tratamientos silviculturales: cuarto aclareo y corta de regeneración. De cada tratamiento silvícola, se delimitaron tres repeticiones en ambas localidades. Los SM presentan una homogeneidad en la conformación de las especies, conteniendo: *Pinus tecunumanii* F. Schwerdtf. ex Eguluz & J.P. Perry, *P. douglasiana* Martínez, *P. patula* Schiede ex Schltdl. & Cham, *P. pseudostrobus* Lindl., *P. montezumae* Lamb, *P. rudis* Endl., *Quercus rugosa* Née, *Q. laurina* Humb et Bonpl. El DN promedio en los SM de la muestra tratamiento con intervención silvícola aclareo fue de 52 cm, con una AT promedio de 37 m con edad promedio de 61 años. Para los SM establecidos en la intervención silvícola corta de regeneración, los promedios fueron DN = 31 cm, AT = 18 m y E = 44 años. Para la muestra control, el promedio del DN en los SM con intervención silvícola aclareo fue de 19 cm, altura promedio de 12 m y edad promedio de 50 años y en la intervención silvícola corta de regeneración se encontró un DN promedio de 59 cm, altura de 34 m y edad promedio de 70 años.

### Medición de los contenidos biomasa por compartimento

Para el cálculo de la biomasa arbórea, se realizó el inventario forestal incluyendo variables dasométricas; utilizando el sistema biométrico para la planeación del manejo forestal sustentable de los ecosistemas con potencial maderable en México (Vargas-Larreta *et al.* 2017); se estimó el volumen total árbol (m<sup>3</sup>) por especie y se extrajo con taladro

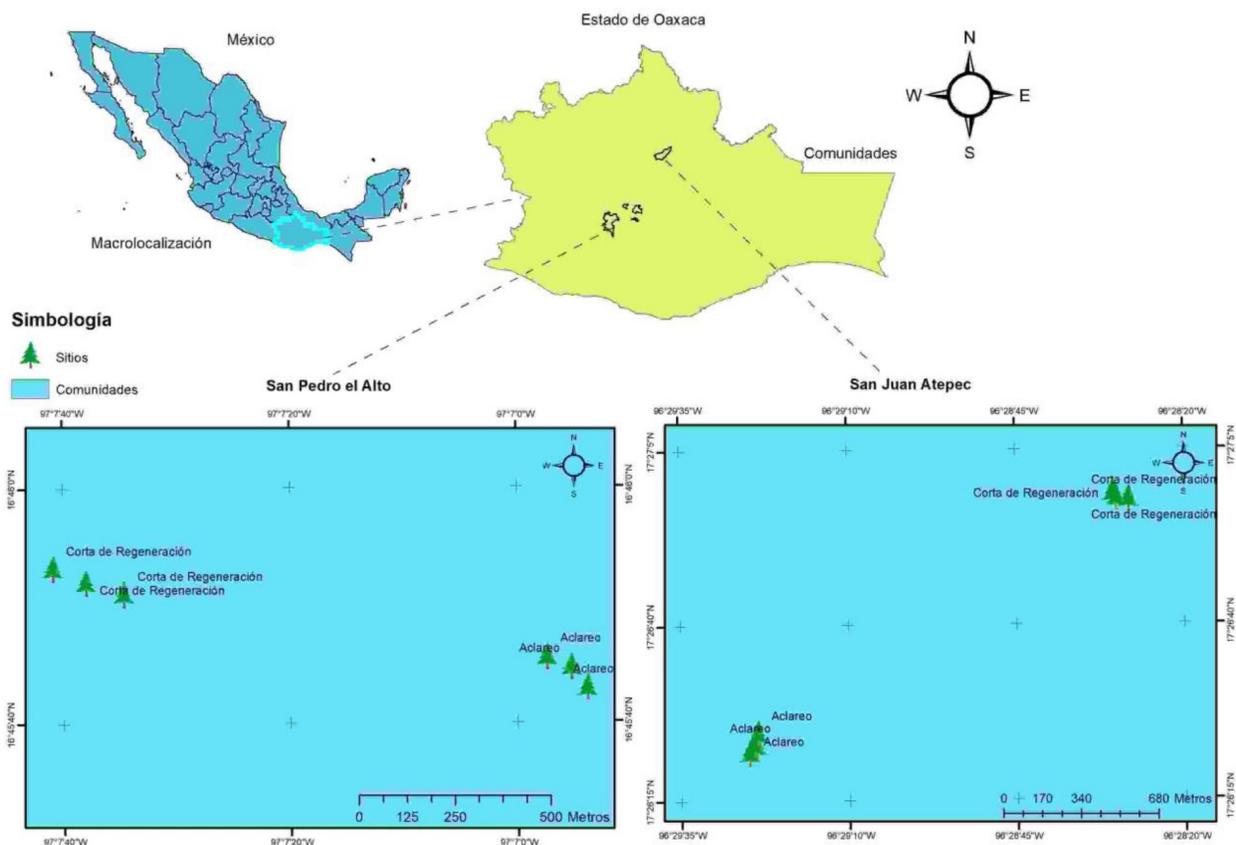


Figura 1. Sitios de muestreo con los tratamientos silvícolas evaluados.

de Pressler una muestra de cilindro a los árboles, a la altura de 1.30 m. Los cilindros de madera fueron medidos con vernier en tres diámetros (cm) y su longitud y su volumen ( $VOLc$ ,  $cm^3$ ) se estimó mediante la ecuación de Newton; las muestras fueron secadas en estufa (Memmert modelo 100-800, Alemania) a temperatura de 102 °C en laboratorio hasta obtener peso constante y obtener peso seco (PS, g). El cociente entre PS/ $VOLc$  generó la gravedad específica de la madera ( $g\ cm^{-3}$ ) y el producto de esta última y el volumen del árbol generó la biomasa por árbol (kg).

$$VOLc = \frac{L}{6}(S_0 + 4S_m + S_l)$$

Donde:  $VOLc$  = Volumen del cilindro ( $cm^3$ ),  $L$  = Longitud del cilindro (cm),  $S_{0,1,2}$  = Área de la sección transversal ( $cm^2$ ) =  $\pi/4 \times (\text{diámetro del cilindro})^2$ .

Los SM circulares de 400  $m^2$  se dividieron en cuatro cuadrantes (I, II, III, IV). Se determinó, la biomasa de arbustos y necromasa en subparcelas encontradas de 9  $m^2$  en los cuadrantes II y IV. La biomasa de herbáceas, hojarasca, suelo y humus se midió en cuatro subparcelas de 1  $m^2$  distribuidas en los cuatro cuadrantes. La muestra de suelo, se obtuvo a una profundidad máxima de 30 cm usando un tubo de PVC<sup>®</sup> con un diámetro de 5.7 cm. De cada subparcela, se obtuvo un total de la biomasa en fresco y con ello, se determinó el peso fresco (PF, kg) usando una báscula Romana de Resorte, Pretul 50 kg 21254; se recolectaron y se identificaron en bolsas de papel, muestras de entre 100 y 500 g con la finalidad de determinar PF y peso seco (PS, kg). Posteriormente, las muestras fueron secadas en una estufa (Memmert modelo 100-800, Alemania) a una temperatura de entre 75 °C y 100 °C en laboratorio.

La biomasa total de cada compartimento se obtuvo mediante factores de conversión (PS/PF) (Chávez-Pascual *et al.* 2017).

### **Análisis de contenido de carbono**

De las seis muestras de biomasa del compartimento de necromasa y arbustivo se tomó una mezcla compuesta y colocó en bolsa de papel identificada por tratamiento, compartimento y por localidad. Por otro lado, de las 12 muestras de biomasa del compartimento herbáceo, hojarasca, humus y suelo se hizo una mezcla compuesta identificada por localidad, tratamiento y compartimento. Las mezclas compuestas fueron enviadas al Laboratorio Nacional de Investigación y Servicio Agroalimentario y Forestal de la Universidad Autónoma Chapingo. El porcentaje de carbono se obtuvo mediante el método de cuantificación en analizador de carbono total. Los contenidos de C generados en laboratorio se utilizaron para inferir los montos de carbono estructural, de compartimentos y suelo (Hernández Vázquez *et al.* 2012).

### **Manejo y análisis estadístico de datos**

El manejo y análisis de los datos se llevó a cabo con el paquete estadístico SAS (SAS 2014). Usando las pruebas de Shapiro-Wilk (procedimiento UNIVARIATE) y Bartlett, se comprobaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza. Los datos de biomasa arbustiva se transformaron a  $\sqrt{x}$ . Para la evaluación de los datos, se utilizó análisis de varianza (PROC GML) y la prueba de separación de medias (Tukey, 0.05) bajo un diseño completamente aleatorio con arreglo factorial 2×2 (localidades, sistemas silvícolas). Se realizaron contrastes ortogonales para contrastar interacciones significativas de los factores. Se hicieron pruebas pareadas de t Student ( $\alpha = 0.05$ ) entre los montos de carbono estructural del árbol y piso forestal. Finalmente, se hizo un análisis clúster para clasificar los sitios de muestreo evaluados en función a los montos de C contenido en la biomasa y suelo.

## **RESULTADOS**

Las localidades certificada y no certificada no mostraron diferencias estadísticas significativas ( $p > 0.05$ ) en los montos de biomasa en árboles, necromasa y hojarasca, así como también, no se encontraron diferencias estadísticas significativas en los contenidos de carbono en árboles, necromasa, arbustos y suelo. Por el contrario, se encontraron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) en la concentración de biomasa y carbono de herbáceas y humus (Tabla 1).

Los TS sólo se diferenciaron ( $p \leq 0.05$ ) en los contenidos de biomasa en herbáceas y hojarasca y en los contenidos de C de este último compartimento; el resto de las variables fueron estadísticamente iguales. Sin embargo, la interacción Loc×TS mostró diferencias estadísticas ( $p \leq 0.05$ ) en casi todas las estructuras y compartimentos evaluados, excepto necromasa, herbáceas y humus. El CV mostró una alta heterogeneidad para el compartimento Bus\_C = 69.6%, siendo éste el valor más alto; por otro lado, el C en suelo mostró el menor CV = 11.0%, indicativo de una mayor homogeneidad (Tabla 1). Los montos de C contenidos en la biomasa estructural y de compartimentos de la comunidad certificada fueron superiores entre 10.8 y 900%, sin embargo, en el compartimento humus, la comunidad no certificada tiene 233.7% más C (Tabla 2).

Las cortas de regeneración tuvieron 75.8% más de C que el tratamiento de aclareo; esto es indicativo, que independientemente de la comunidad, los TS fueron correctamente estandarizados, ya que las estructuras (árboles) y compartimentos de mayores montos (suelo, humus) fueron estadísticamente iguales.

Analizando los factores individuales, el papel del FSC no muestra efecto claro en las concentraciones de biomasa y carbono; sin embargo, en la interacción se observa un efecto altamente significativo ( $p \leq 0.01$ ) en casi todos los compartimentos evaluados, con excepción de los compartimentos necromasa, herbácea y humus en biomasa y C (Tabla 2). En el análisis de contrastes ortogonales se detectaron diferencias significativas ( $p \leq 0.02$ ) en-

**Tabla 1.** Resumen del análisis de varianza en contenidos de carbono en biomasa estructural y de compartimentos.

Variable	DF (error)	Loc	TS	Loc×TS	Error	CV (%)
Tree_B	8	7437.5 <sup>ns</sup>	6658.0 <sup>ns</sup>	117474.93 <sup>**</sup>	2158.5	27.6
Nec_B	8	318.2 <sup>ns</sup>	87.6 <sup>ns</sup>	410.66 <sup>ns</sup>	146.6	48.1
Bus_B $\pi$	8	0.90*	0.0005 <sup>ns</sup>	1.62 <sup>**</sup>	0.16	32
Herb_B	8	9.80 <sup>**</sup>	1.71*	0.50 <sup>ns</sup>	0.2	34.5
Llit_B	8	5.71 <sup>ns</sup>	85.2*	73.67 <sup>**</sup>	8.7	29.6
Humus_B	8	5728.69 <sup>**</sup>	86.8 <sup>ns</sup>	161.67 <sup>ns</sup>	282.8	32.4
Tree_C	8	1171.46 <sup>ns</sup>	1354.6 <sup>ns</sup>	23132.94 <sup>**</sup>	434.6	27.6
Nec_C	8	45.61 <sup>ns</sup>	15.7 <sup>ns</sup>	87.41 <sup>ns</sup>	31.5	48.6
Bus_C	8	7.35 <sup>ns</sup>	0.40 <sup>ns</sup>	10.64 <sup>**</sup>	1.84	69.6
Herb_C	8	2.34 <sup>**</sup>	0.07 <sup>ns</sup>	0.0002 <sup>ns</sup>	0.08	46.3
Llit_C	8	1.610 <sup>ns</sup>	19.3*	21.38 <sup>**</sup>	2.14	31.8
Humus_C	8	1391.79 <sup>**</sup>	3.5 <sup>ns</sup>	10.67 <sup>ns</sup>	42.48	32.5
Soil_C	8	507.65 <sup>ns</sup>	295.8 <sup>ns</sup>	5651.18 <sup>**</sup>	198.8	11

B = biomasa, C = carbono, Nec = necromasa, Bus = arbustos, Herb = herbáceas, Llit = hojarasca, DF = grados de libertad, Loc = Localidad, TS= tratamiento silvícola, CV = coeficiente de variación,  $\pi$  transformación  $\sqrt{x}$ , \* valores significativos de F ( $p \leq 0.05$ ), \*\* valores de F altamente significativos ( $p \leq 0.01$ ), <sup>ns</sup> valores F no significativos ( $p > 0.05$ ).

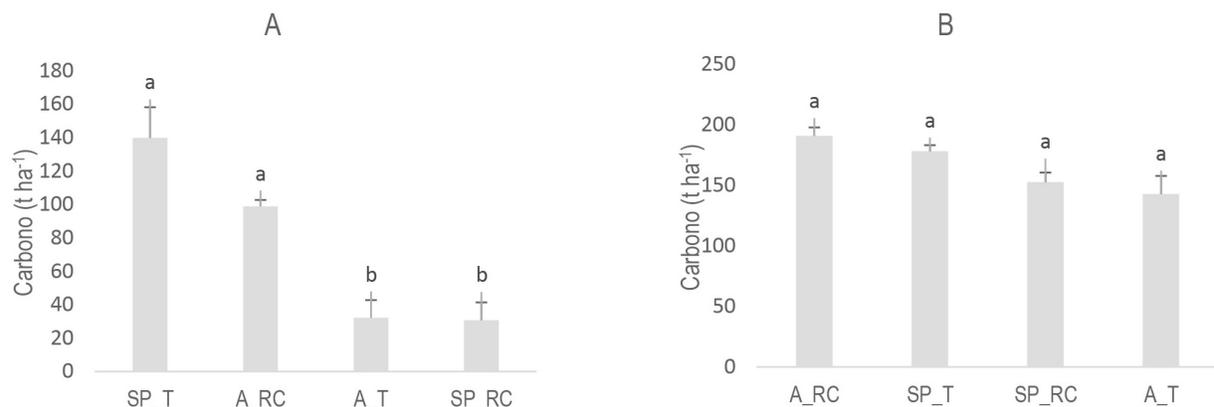
**Tabla 2.** Contenidos de carbono en biomasa ( $t\ ha^{-1}$ ) entre tratamientos silvícolas de la localidad certificada y no certificada por el Forest Stewardship Council.

Variable	Localidad		Tratamiento silvícola	
	San Pedro	Atepec	Corta de regeneración	Aclareo
Tree_B	192.9 ± 59 <sup>a</sup>	143.11 ± 34.9 <sup>a</sup>	144.4 ± 34.7 <sup>a</sup>	191.5 ± 59.4 <sup>a</sup>
Nec_B	30.3 ± 6.1 <sup>a</sup>	20 ± 4.2 <sup>a</sup>	27.8 ± 7.6 <sup>a</sup>	22.4 ± 2.3 <sup>a</sup>
Bus_B	2.7 ± 0.8 <sup>a</sup>	1.1 ± 0.3 <sup>a</sup>	2.1 ± 0.9 <sup>a</sup>	1.7 ± 0.3 <sup>a</sup>
Herb_B	2.2 ± 0.3 <sup>a</sup>	0.4 ± 0.1 <sup>b</sup>	1.7 ± 0.5 <sup>a</sup>	0.9 ± 0.3 <sup>b</sup>
Llit_B	10.6 ± 2.4 <sup>a</sup>	9.2 ± 1.5 <sup>a</sup>	7.3 ± 1.1 <sup>b</sup>	12.6 ± 1.9 <sup>a</sup>
Humus_B	29.9 ± 5.5 <sup>b</sup>	73.6 ± 7.3 <sup>a</sup>	54.4 ± 11.5 <sup>a</sup>	49 ± 11.7 <sup>a</sup>
Tree_C	85.2 ± 26.1 <sup>a</sup>	65.4 ± 15.7 <sup>a</sup>	64.7 ± 16 <sup>a</sup>	85.9 ± 25.8 <sup>a</sup>
Nec_C	13.4 ± 2.7 <sup>a</sup>	9.5 ± 2 <sup>a</sup>	12.6 ± 3.3 <sup>a</sup>	10.3 ± 1.2 <sup>a</sup>
Bus_C	2.7 ± 0.8 <sup>a</sup>	1.1 ± 0.3 <sup>a</sup>	2.1 ± 0.9 <sup>a</sup>	1.7 ± 0.3 <sup>a</sup>
Herb_C	1 ± 0.1 <sup>a</sup>	0.1 ± 0.07 <sup>b</sup>	0.7 ± 0.2 <sup>a</sup>	0.5 ± 0.2 <sup>a</sup>
Llit_C	4.9 ± 1.2 <sup>a</sup>	4.2 ± 0.5 <sup>a</sup>	3.3 ± 0.5 <sup>b</sup>	5.8 ± 1 <sup>a</sup>
Humus_C	9.2 ± 1.5 <sup>b</sup>	30.7 ± 3 <sup>a</sup>	20.5 ± 5.4 <sup>a</sup>	19.4 ± 5.3 <sup>a</sup>
Soil_C	133.7 ± 8.4 <sup>a</sup>	120.7 ± 13.4 <sup>a</sup>	132.2 ± 7.8 <sup>a</sup>	122.2 ± 1.4 <sup>a</sup>

B = biomasa, C = carbono, Nec = necromass, Bus = arbustos, Herb = herbáceas, Llit = hojarasca, a y b = letras distintas por localidad y tratamiento silvícola indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05), ± = error estándar.

tre ambas comunidades, al comparar el mismo TS de aclareo en los montos de C secuestrado en la parte estructural de los árboles, la comunidad certificada generó 334% (139.8 vs 32.2 tC ha<sup>-1</sup>) (Figura 2A); sin embargo, en el TS cortas de regeneración esta relación se invierte, teniendo la comunidad no certificada 98.8 tC ha<sup>-1</sup>, que representa un incremento de 68.9% ( $p \leq 0.02$ ). El mismo TS es aplicado de diferente manera entre comunidades con FSC y sin certificación, sin embargo, en campo se observó que en comunidad no certificada tenía una densidad residual de 508 árboles ha<sup>-1</sup> con volu-

men de 9.36 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, a diferencia de la comunidad certificada donde se encontró una densidad residual de 216 árboles ha<sup>-1</sup> y volumen de 4.72 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Con respecto a los residuos de la actividad del aprovechamiento se encontró que estos estaban dispersos a granel por toda el área sin la aplicación de alguna actividad complementaria. En el TS corta de regeneración aplicado en la comunidad no certificada tenía una densidad residual promedio de 91 árboles ha<sup>-1</sup>, con un volumen de 5.28 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, mientras que en la localidad certificada tenía una densidad residual promedio de 66 árboles ha<sup>-1</sup>, un volumen de 1.97 m<sup>3</sup>



**Figura 2.** Secuestro de carbono en la estructura arbórea (A) vs piso forestal (B) entre tratamientos silvícolas de comunidades no certificadas y certificadas por FSC. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05). Las líneas verticales sobre las barras indican el error estándar, SP = San Pedro, A = Atepec, RC = Regeneration cut, T = Thinning.

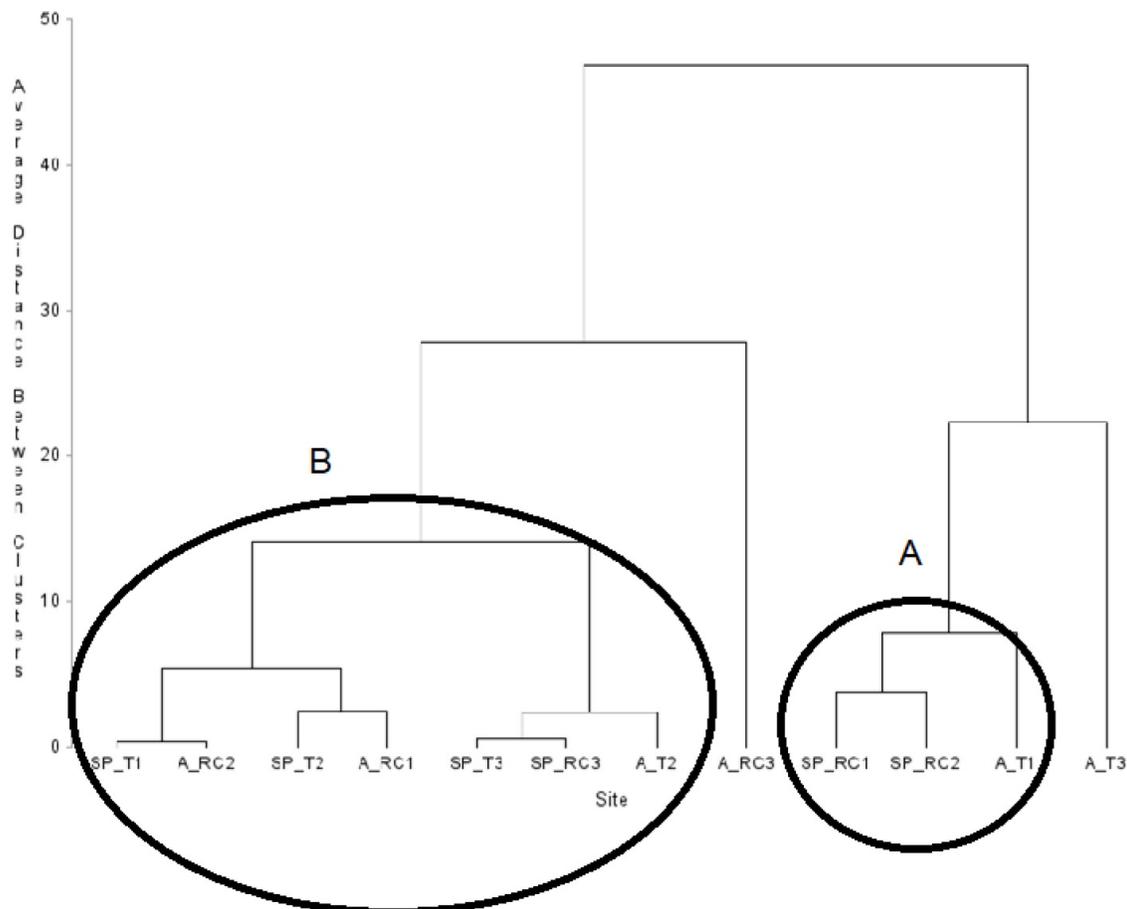
$\text{ha}^{-1}$ , por otro lado, el material residual derivado del aprovechamiento no tenía un adecuado acomodo en curvas a nivel.

Al comparar las estructuras vegetales (arbus-tos y herbáceas) y compartimentos (necromasa, ho-jarasca, humus y suelo) no incluidos en los montos de C, los contrastes ortogonales mostraron diferen-cias ( $p \leq 0.02$ ) entre ambas comunidades, teniendo la localidad certificada 24.9% mayor cantidad (178.0  $\text{tC ha}^{-1}$ ); en el mismo sentido, esta situación se re-vierte en el TS cortas de regeneración, donde la lo-calidad sin certificación presenta un incremento por-centual de 20.1% ( $p \leq 0.02$ ) con un monto promedio de 198.1  $\text{tC ha}^{-1}$ .

El análisis clúster (Figura 3) separa a una dis-tancia de 46.79 dos grupos (A y B), en el grupo A incluye en general las cortas de regeneración de San Pedro y los TS de aclareo de San Juan Atepec, en este grupo se hace una separación de A T3 a una dis-tancia de 22.33; el grupo B a una distancia promedio de 27.85, separa el sitio A\_RC3 dejando seis sitios de la comunidad con certificación (Figura 3). Esto indica que hay similitud en la concentración de car-bono en el piso forestal en estos sitios sin importar el tipo de tratamiento. Esta similitud puede deberse a que las cortas de regeneración en los sitios de la localidad sin certificación tenían altas densidades de árboles, lo cual sugiere que no se está aplicando el tratamiento como lo establecen los criterios técnicos.

## DISCUSIÓN

A nivel localidad (certificada vs no certificada) los resultados no muestran diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en la acumulación de biomasa (árboles, necromasa y hojarasca) y montos de carbono (necro-masa, arbustos y suelo), sólo se logran diferenciar las estructuras herbáceas y arbustivas, así como el compartimento del humus. A través de los años se entiende que una comunidad certificada va acumu-lando mayores montos al piso forestal por las bue-nas prácticas forestales a las que obliga la certifi-cación: pica del material, acomodo de material, re-moción de materia orgánica, limpieza de arbustos y herbáceas. Al respecto, Charmakar *et al.* (2021) concluyen que aun con sus limitaciones espaciales y temporales las prácticas forestales certificadas con-tribuyen en la restauración de los bosques degrada-dos, mejoran las prácticas forestales y que, además, estas actividades pueden mejorar los montos de car-bono, los cuales pueden ser colocados en los mer-cados voluntarios de carbono. Otro punto importante es que las comunidades forestales tengan o no una certificación, se organizan para tomar acciones sobre sus recursos, al tiempo que hoy día son conscientes de la importancia de los bosques en la contribución de servicios ecosistémicos, incluido el secuestro de carbono, el cual incorporado al mercado voluntario puede diversificar la economía local. En este sentido, Ramírez *et al.* (2019) mencionan que las co-



**Figura 3.** Interacción de los sitios de muestreo entre grupo de control y tratamiento. SP = San Pedro (certificado con FSC), A = San Juan Atepec (no certificada), T = aclareo, CR = cortas de regeneración.

munidades forestales indígenas a través del manejo de sus bosques pueden contribuir de manera importante en la continua provisión de los servicios ecosistémicos. La organización comunitaria, gobernanza local de los bosques, así como acciones participativas dentro de la comunidad orientadas a la gestión de sus recursos forestales son acciones que contribuyen en la mitigación del cambio climático (Sheppard *et al.* 2011). Del mismo modo, los tratamientos silvícolas (ST) solo mostraron diferencias ( $p < 0.05$ ) en los contenidos de biomasa en herbáceas y hojarasca y en los montos de carbono solo en este último compartimento.

Por si solos, Loc y TS no muestran un efecto claro de la certificación forestal FSC en la concen-

tración de biomasa y carbono; sin embargo, en la interacción entre ambos factores se aprecia un efecto altamente significativo ( $p \leq 0.01$ ) en la mayoría de los compartimentos evaluados. Esta diferencia entre ambas comunidades puede deberse principalmente en la manera de aplicar los TS, ya que en los contrastes ortogonales se observaron diferencias significativas en la parte estructural de los árboles ( $p \leq 0.02$ ) entre ambas comunidades al hacer la comparación entre los tratamientos. Se observó que el TS aclareo en la localidad certificada tuvo efecto positivo en los montos de carbono, almacenando 334% más respecto a la comunidad no certificada. Sin embargo, el TS corta de regeneración en la localidad no certificada tuvo un incremento de 68.9% más respecto a la localidad

certificada, este incremento se explica al observar en campo mayor densidad residual y menor intensidad de corta. En este sentido, Monárrez-González *et al.* (2018) mencionan que un bosque bajo un adecuado manejo permite una mejor estructura del arbolado favoreciendo el secuestro de carbono. Por otro lado, Rodríguez-Ortiz *et al.* (2011) reportan que los tratamientos silvícolas desempeñan un papel importante en la acumulación de biomasa en la estructura del árbol, ya que una vez aplicado el TS aclareo se generan mejores condiciones de competencia por nutrientes, luz solar y agua.

El TS aclareo en la localidad certificada tuvo menor densidad de árboles y un menor volumen residual respecto a la comunidad no certificada; sin embargo, los resultados muestran un mayor contenido de C en la estructura del árbol, esto concuerda con lo señalado por Chávez-Pascual *et al.* (2017) quienes mencionan que eliminar árboles (aclareo) puede disminuir la biomasa en pie a nivel rodal, pero pasado 3-5 años se recupera la productividad inicial y la superan, y que los bosques sin un adecuado manejo pueden aumentar la biomasa pero esta disminuye a nivel árbol. En este sentido, Cortés-Pérez *et al.* (2021), y Lecina-Díaz *et al.* (2018) señalan que un bosque manejado adecuadamente incrementa los montos de biomasa, esto significa que una adecuada densidad y diversidad arbórea permite mayores concentraciones de C. De acuerdo con Rontard *et al.* (2020) el mercado voluntario de créditos de carbono, únicamente considera lo que se almacena en la biomasa del árbol sin tomar en cuenta otros compartimentos del ecosistema. En relación a esto, y considerando que los estudios en su mayoría se refieren únicamente al carbono estructural del árbol, Ordóñez Díaz *et al.* (2014) encontraron que un bosque de pino-encino bajo manejo almacena en la biomasa del árbol un promedio de 129.1 tC ha<sup>-1</sup> y concluyen que estos montos tienen potencial para ser colocados en los mercados de carbono; por otro lado, Cortés-Pérez *et al.* (2021) evaluaron el carbono aéreo almacenado en bosques templados de Oaxaca y señalan que un bosque sin manejo almacena en promedio 164.7 tC ha<sup>-1</sup>, aquí es importante considerar que estos montos tienen potencial para ser colocados en los mer-

cados de carbono; sin embargo, no son aprovechados para producción maderable. A diferencia de estos estudios, este análisis incluye el carbono almacenado en el piso forestal y se observa que estos montos pueden ser considerados en el mercado de créditos de carbono, ya que los resultados muestran que la localidad certificada en el TS aclareo en arbustos, herbáceas, necromasa, hojarasca, humus y suelo tuvo mayor carbono almacenado con 178.0 tC ha<sup>-1</sup>, a diferencia de lo que se almacena en la parte estructural del árbol con 139.7 tC ha<sup>-1</sup>. En el mismo sentido, esta situación se revierte en el TS cortas de regeneración, donde la localidad sin certificación presenta un incremento porcentual de 20.1% ( $p \leq 0.02$ ) con un monto promedio de 198.1 tC ha<sup>-1</sup>. Estos resultados indican que ambas localidades tienen potencial para poder participar en el mercado voluntario de carbono, considerando lo que se almacena en el piso forestal.

Con respecto a los compartimentos del piso forestal, la comunidad certificada para el TS aclareo mostró diferencias significativas en el aumento de carbono con 862% en la estructura vegetal arbustiva, pero esta situación se revirtió en el TS corta de regeneración, ya que la comunidad no certificada tuvo un aumento del 20% respecto a la comunidad certificada. La hojarasca en ambos TS en la comunidad no certificada mostró mayores contenidos de carbono con un promedio de 80%. En lo que se refiere al carbono contenido en el suelo en la comunidad certificada, el TS aclareo tuvo un aumento en el secuestro de carbono de 59%; sin embargo, en la comunidad no certificada, el TS corta de regeneración mostró mayores concentraciones de carbono con un 25% más respecto a la comunidad certificada.

Los resultados dejan a la vista que las actividades del manejo forestal tienen un papel muy importante en las concentraciones de carbono en el piso forestal, otra actividad forestal que permite mayor o menor concentración de biomasa y carbono son las actividades complementarias aplicadas después de la extracción de madera. En campo se pudo observar que en la comunidad no certificada los dos TS evaluados tenían altas densidades de árboles (508 árboles ha<sup>-1</sup> para aclareo y 91 árboles

ha<sup>-1</sup> para corta de regeneración), más diversidad de especies y no había un seguimiento adecuado de actividades complementarias como el acomodo de residuos derivados del aprovechamiento. Al respecto Schulp *et al.* (2008) señalan que las especies y grupos de árboles tienen influencia en las existencias de carbono en el piso forestal. Por otro lado, Garrett *et al.* (2021) mencionan que es importante evitar remociones severas de los residuos derivados del aprovechamiento para aumentar los montos de carbono y mantener la productividad del sitio a largo plazo. Algunos autores como Hedde *et al.* (2008) resaltan la importancia de desarrollar actividades de extracción que reduzcan lo más que se pueda impactos negativos en el piso forestal, ya que durante las intervenciones de manejo el suelo es alterado, lo cual disminuye los montos de carbono contenidos en el piso forestal, pero que, pasado un periodo de tiempo, recupera su productividad. Sin embargo, Johnson y Curtis (2001) no encontraron efectos claros del manejo en general sobre el piso forestal, sino que más bien, los efectos tenían relación con las especies de los árboles y muy puntualmente sobre el tipo de gestión. En este mismo sentido, Jandl *et al.* (2007) encontraron que las perturbaciones o alteraciones mejoran la mineralización del suelo.

## CONCLUSIONES

Los bosques comunitarios con manejo forestal maderable, certificados o no certificados pueden incrementar en 120.2% el secuestro de carbono (C), al incorporar el piso forestal a los montos almacenados en el C estructural del árbol. Por otro lado, las actividades de manejo forestal asociadas a la certificación, el tratamiento silvícola (TS) aclareo

genera mayores reservas de C en la estructura arbórea (107.57 tC ha<sup>-1</sup>), que representa 334% más C respecto al manejo forestal sin certificación. El tratamiento silvícola Corta de Regeneración (CR), decrementó los montos de carbono en la comunidad con gestión forestal certificado en 221% (68.05 tC ha<sup>-1</sup>); sin embargo, a pesar de esto, se observa que los rodales bajo el FSC, generan en cualquier TS mayores reservas de C estructural arbóreo. Al nivel de piso forestal los montos de C no se diferenciaron entre comunidades, generando 165.97 tC ha<sup>-1</sup>, independiente del TS que se aplique. Las estimaciones de C almacenados en estructuras y compartimentos del piso forestal de los bosques manejados bajo el enfoque de la certificación forestal FSC, pueden ser de utilidad para los tomadores de decisiones sobre la implementación de estrategias que permitan mejorar las actividades de gestión forestal, las cuales repercuten en los incrementos de los montos de C a nivel árbol y piso forestal.

## AGRADECIMIENTOS

A las autoridades comunales de San Pedro el Alto, Zimatlán y San Juan Bautista Atepec, Oaxaca. Al Ing. Raúl Moisés Hernández Cortez encargado de los Servicios Técnicos Forestales de la comunidad de San Pedro el Alto, Zimatlán, Oaxaca. Al Ing. Octavio Pérez Pérez prestador de Servicios Técnicos de la comunidad de San Juan Bautista Atepec, Oaxaca. Al Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO), por la herramienta y material de laboratorio para procesar las muestras de campo. A mi amigo y compañero Leonel Enrique Hernández González por su apoyo y consejos.

## LITERATURA CITADA

- Auld G, Gulbrandsen LH, McDermott CL (2008) Certification schemes and the impacts on forests and forestry. Annual Review of Environment and Resources 33: 187-211.
- Charmakar S, Oli-Nath B, Joshi Raj N, Maraseni Narayan T, Atreya K (2021) Forest carbon storage and species richness in FSC Certified and non-certified community forests in Nepal. Small-scale Forestry 20: 199-219.
- Chávez-Pascual EY, Rodríguez-Ortiz G, Carrillo-Rodríguez JC, Enríquez-del Valle JR, Chávez-Servia JL, Campos-Ángeles GV (2013) Factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen.

- Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 3: 1272-1284.
- Chávez-Pascual EY, Rodríguez-Ortiz G, Enríquez-del Valle RJ, Velasco-Velasco VA, Gómez-Cárdenas M (2017) Compartimentos de biomasa aérea en rodales de *Pinus oaxacana* bajo tratamientos silvícolas. *Madera Bosques* 23: 147-161.
- Cortés-Pérez M, León-González F, Paz-Pellat F, Leyva-Pablo T, Santiago-García W, Ponce-Mendoza A, Fuentes-Ponce M (2021) Almacenamiento de carbono aéreo en un bosque templado de Oaxaca: manejo de alta y baja intensidad. *Madera y Bosques* 27(4): DOI: 10.21829/myb.2021.2742440.
- Damette O, Delacote P (2011) Unsustainable timber harvesting, deforestation and the role of certification. *Ecological Economics* 70: 1211-1219.
- Federici S, Tubiello FN, Salvatore M, Jacobs H, Schmidhuber J (2015) New estimates of CO<sub>2</sub> forest emissions and removals: 1990-2015. *Forest Ecology and Management* 352: 89-98.
- Gardner TA, Barlow J, Chazdon R, Ewers RM, Harvey CA, Peres CA, Sodhi NS (2009) Prospects for tropical forest biodiversity in a human-modified world. *Ecology Letters* 12: 561-582.
- Garrett LG, Smaill SJ, Beets PN, Kimberley MO, Clinton PW (2021) Impacts of forest harvest removal and fertiliser additions on end of rotation biomass, carbon and nutrient stocks of *Pinus radiata*. *Forest Ecology and Management* 493. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119161.
- Hedde M, Aubert M, Decaëns T, Bureau F (2008) Dynamics of soil carbon in a beechwood chronosequence forest. *Forest Ecology and Management* 255: 193-202.
- Hernández Vásquez E, Campos Ángeles GV, Enríquez Del Valle R, Rodríguez-Ortiz, Arturo GV, Velasco V (2012) Captura de carbono por *Inga jinicuil* Schldt: En un sistema agroforestal de café bajo sombra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3: 11-21.
- Jandl R, Lindner M, Vesterdal L, Bauwens B, Baritz R, Hagedorn F, Johnson DW, Minkinen K, Byrne KA (2007) How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137: 253-268.
- Johnson DW, Curtis PS (2001) Effects of forest management on soil C and N storage: meta-analysis. *Forest Ecology and Management* 140: 227-238.
- Lamsal P, Kumar L, Shabani F, Atreya K (2017) The greening of the Himalayas and Tibetan Plateau under climate change. *Global and Planetary Change* 159: 77-92.
- Lecina-Díaz J, Álvarez A, Regos A, Drapeau P, Paquette A, Messier C, Retana J (2018) The positive carbon stocks-biodiversity relationship in forests: co-occurrence and drivers across five subclimates. *Ecological Applications* 28: 1481-1493.
- Leyva-Pablo T, de León-González F, Etchevers-Barra JD, Cortés-Pérez M, Santiago-García W, Mendoza AP, Fuentes-Ponce MH (2021) Carbon storage in forests with community forest management. *Madera y Bosques* 27. DOI: 10.21829/myb.2021.2742421.
- Monárrez-González JC, Pérez-Verdín G, López-González C, Márquez-Linares MA, González-Elizondo MS (2018) Effects of forest management on some ecosystem services in temperate forest ecosystems of Mexico. *Madera y Bosques* 24. DOI: 10.21829/myb.2018.2421569.
- Nath-Oli B, Shrestha K (2009) Carbon Status in Forests of Nepal: An Overview. *Journal of Forest and Livelihood* 8: 62-66.
- Ordóñez Díaz JAB, Rivera Vázquez R, Tapia Medina ME, Ahedo Hernández LR (2014) Carbon content and its potential sequestration in the forest biomass of San Pedro Jacuaro, Michoacán State. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6: 7-16.

- Pettenella D, Brotto L (2012) Governance features for successful REDD+ projects organization. *Forest Policy and Economics* 18: 46-52.
- Putz FE, Zuidema PA, Pinard MA, Boot RGA, Sayer JA, Sheil D, Sist, P, Elias, Vanclay JK (2008) Improved tropical forest management for carbon retention. *PLoS Biology* 6: 368-1369.
- Rametsteiner E, Simula M (2003) Forest certification- an instrument to promote sustainable forest management? *Journal of Environmental Management* 67: 87-98.
- Ramírez MI, Benet D, Pérez-Salicrup DR, Skutsch M, Venegas-Pérez Y (2019) Community participation for carbon measurement in forests of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente* 25: 333-352.
- Ríos-Camey JM, Aguirre-Calderón OA, Treviño-Garza EJ, Jiménez-Pérez J, Alanís-Rodríguez E, De Los Santos-Posadas HM (2021) Biomass and carbon growth and increases of *Pinus teocote* Schltdl. et Cham. And *Pinus oocarpa* Schiede., State of Guerrero, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12: 81-109.
- Rodríguez-Ortiz G, González-Hernández VA, Aldrete A, De Los Santos-Posadas HM, Gómez-Guerrero LA, Fierros-González AM (2011) Modelos para estimar crecimiento y eficiencia de crecimiento en plantaciones de *Pinus patula* en respuesta al aclareo. *Revista Fitotecnia Mexicana* 34: 205-2011.
- Rontard B, Reyes Hernández H, Aguilar Robledo M (2020) Pagos por captura de carbono en el mercado voluntario en México: diversidad y complejidad de su aplicación en Chiapas y Oaxaca. *Sociedad y Ambiente* 22: 212-236.
- SAS (2014) Programming with Base SAS® 9.4, Second Edition. SAS Institute. Cary, NC. USA. 900p.
- Schulp CJE, Nabuurs GJ, Verburg PH, De Waal RW (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: 482-490.
- Serrano-Ramírez E, Valdez-Lazal JR, De los Santos-Posadas HM, Mora-Gutiérrez RA, Ángeles-Pérez G, Hernández-Cortez RM (2022) San Pedro el Alto, Oaxaca, México: ejemplo de manejo forestal comunitario que detona avance socioeconómico. *Economía y Sociedad* 27: 1-30. DOI: 10.15359/eyes.27-61.1.
- Sheppard SRJ, Shaw A, Flanders D, Burch S, Wiek A, Carmichael J, Robinson J, Cohen S (2011) Future visioning of local climate change: A framework for community engagement and planning with scenarios and visualisation. *Futures* 43: 400-412.
- Vargas-Larreta B, Corral-Rivas JJ, Aguirre-Calderón OA, López-Martínez JO, Santos-Posada HM, Zamudio-Sánchez FJ, Treviño-Garza EJ, Martínez-Salvador M, Aguirre-Calderón CG (2017) SiBiFor: Forest Biometric System for forest management in México. *Revista Chapingo* 23: 437-455.