
MERCADOS DE CARBONO PARA LOS CAFETALES BAJO SOMBRA DE LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS

CARBON MARKETS FOR SHADE-GROWN COFFEE PLANTATIONS IN THE SIERRA MADRE OF CHIAPAS

Fernando Paz^{1†}, Víctor Salas², Alma S. Velázquez³, Antoine Libert⁴ y Martín A. Bolaños⁵

¹Programa Mexicano del Carbono y Colegio de Postgraduados, Estado de México, México

²Geoinformática, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

³Facultad de Ciencias, *campus* El Cerrillo, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, Estado de México.

⁴Programa Mexicano del Carbono, Estado de México, México,

⁵Posgrado en Hidrociencias, Colegio de Postgraduados *campus* Montecillo, Estado de México, México.

†Autor para correspondencia: ferpazpel@gmail.com

RESUMEN

En el contexto internacional se han negociado diversos mecanismos para la reducción de emisiones de gases efecto invernadero del sector forestal y la distribución de sus beneficios. Los mercados voluntarios de carbono han implementado transacciones que han permitido ganar experiencia dentro del sector privado. El Programa Mexicano del Carbono en el 2016 instrumentó una campaña para conocer los almacenes de carbono de los cafetales bajo sombra y vegetación natural en la Sierra Madre de Chiapas, región que contiene el 54% de la superficie del café en el estado, que es el principal productor de café en el país. La evaluación de los almacenes de carbono en los cafetales bajo sombra y vegetación natural, se extiende en este trabajo al considerar los datos de numerosos autores para su análisis, bajo la perspectiva de los mercados del carbono. Las evaluaciones realizadas para el caso de deforestación primaria (de bosques/selvas a otros usos del suelo), degradación forestal (cambios en los tipos de cafetales) y cambios de cafetales a otros usos del suelo (milpas y potreros), permitieron evaluar las ganancias y pérdidas de carbono y, en consecuencia, los costos económicos asociados a tales acciones. Los resultados muestran que las compensaciones financieras por mantener a los bosques y la sombra de los cafetales son competitivas respecto a los pagos por servicios ambientales instrumentados por la Comisión Nacional Forestal, por lo que la propuesta de pagos por conservación de los bosques/selvas y la sombra de los cafetales son viables y atractivos.

Palabras clave: *tipología de cafetales; almacenes de carbono; cambios de uso del suelo; ganancias y pérdidas de carbono; pagos por conservación.*

ABSTRACT

In the international context, various mechanisms have been negotiated for the reduction of greenhouse gas emissions from the forestry sector and the distribution of its benefits. Voluntary markets have implemented carbon market transactions to facilitate gaining experience within the private sector. The Mexican Carbon Program in 2016 implemented a campaign to learn about the carbon stocks of coffee plantations under shade and natural vegetation in the Sierra Madre de Chiapas, a region that contains 54% of the coffee surface in the state, that is the main producer of coffee in the country. The evaluation of carbon stocks in coffee plantations under shade and natural vegetation is extended in this work by considering the data of numerous authors, for analysis from the perspective of carbon markets. The evaluations carried out for the case of primary deforestation (from forests/jungles to other land uses), forest degradation (changes in the types of coffee plantations) and changes from coffee plantations to other land uses (milpas and pastures), allowed evaluating the profits and carbon losses and hence the economic costs associated with such actions. The results show that the financial compensation for maintaining the

forests and the shade of the coffee plantations is competitive with respect to payments for environmental services implemented by the National Forestry Commission, for which the proposal of payments for the conservation of the forests/jungles and the shade of coffee plantations are viable and attractive.

Keywords: *typology of coffee plantations; carbon stocks; land use changes; carbon gains and losses; conservation payments.*

INTRODUCCIÓN

Los mecanismos de la distribución de beneficios de los mercados del carbono han sido tema de discusión dentro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), asociada a la reducción de emisiones de gases efecto invernadero (GEI). Sin considerar el Protocolo de Kioto, los mecanismos asociados al sector forestal iniciaron en el 2005 con la propuesta de Papúa Nueva Guinea y Costa Rica (UNFCCC, 2005) para Reducción de Emisiones por Deforestación evitada (RED) y posteriormente, con el denominado “Plan de Acción Bali” (UNFCCC, 2007) se agregó la degradación forestal, para la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación forestal evitada (REDD). Actualmente, el mecanismo REDD+ (Reducción de emisiones por Deforestación y Degradación forestal evitada más la conservación e incremento de los almacenes de carbono y el manejo forestal sustentable) (UNFCCC, 2009) está en proceso de negociación entre las partes de la CMNUCC. En México, la CONAFOR (2017a) definió la estrategia nacional para REDD+, donde menciona la propuesta de mecanismos de distribución de beneficios, en proceso de implementación con la Iniciativa de Reducción de Emisiones (IRE) (CONAFOR, 2017b).

Aparte de los mercados regulados (CMNUCC), se han abierto mercados voluntarios (Donofrio *et al.*, 2021; Natzler *et al.*, 2022) que realizan transacciones (compra y venta) del mercado del carbono entre entes privados, facilitando los procesos de emergencia de mercados voluntarios y contribuyendo a la experiencia de las implementaciones, a través de negociaciones para pactar precios del carbono (t CO₂). Los compradores son generalmente empresas privadas que tratan de mitigar su huella del carbono con fines ambientales y de imagen.

Para realizar transacciones en los mercados del carbono, es necesario cumplir una serie de requisitos

(línea base, adicionalidad, fugas, permanencia, entre otros), lo que las hace costosas, tanto en tiempo como en recursos económicos, además de basarse en una situación hipotética (línea base). La implementación de REDD+ no ha sido tan exitosa como se pensaba (Angelsen *et al.*, 2021). La propuesta del Banco Mexicano del Carbono (Paz-Pellat, 2022a) consiste fundamentalmente en simplificar y abaratar las transacciones utilizando mecanismos flexibles, en base a la conceptualización de las reducciones evitadas como procesos de conservación de los almacenes de carbono (Paz-Pellat, 2022b).

La cafeticultura bajo sombra se localizada principalmente en el sureste de México, siendo Chiapas el principal productor del país de café arábigo (SAGARPA, 2017). El estado de Chiapas produce el 41% del total nacional (CEDRSSA, 2019), en condiciones de bajo desarrollo socioeconómico y pobreza, que hace a los productores altamente vulnerables ante impactos externos, tales como la epidemia de la roya que se presentó a partir del 2012 (Avelino *et al.* 2015; Libert-Amico *et al.*, 2020). La región de la Sierra Madre de Chiapas, que alberga el 54% de la superficie cafetalera del estado (SAGARPA, 2017), presenta condiciones de alta vulnerabilidad a los riesgos climáticos, donde las comunidades rurales e indígenas y equiparables resienten los eventos hidrometeorológicos extremos que ponen en riesgo los medios de vida de los productores (Libert-Amico *et al.*, 2020). La epidemia de la roya ha provocado deforestación (cambio de cafetales a milpas y potreros) y degradación forestal (reducción de la sombra), además de la pérdida de la diversidad vegetal (Libert-Amico *et al.*, 2016; Perfecto *et al.*, 2019; Harvey *et al.*, 2021).

El Programa Mexicano del Carbono implementó en la región de la Sierra Madre de Chiapas, en el 2016, la campaña “Una REDD+ para salvar la sombra de la Sierra Madre de Chiapas”, orientada a caracterizar los almacenes de carbono de los cafetales bajo sombra y

la vegetación natural en la región, además de evaluar los impactos de la roya del café. Esta campaña fue la base para el proyecto “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas” (Bolaños *et al.*, 2021), actualmente financiado por el CONACYT, el cual tiene como objetivo caracterizar los almacenes de carbono de las componentes (biomasa viva aérea, carbono orgánico del suelo, mantillo, madera muerta, biomasa viva subterránea) de los cafetales.

Los cafetales bajo sombra tienen un alto potencial de captura de carbono (Pineda-López *et al.*, 2005), por lo que son susceptibles de recibir pagos económicos por su conservación (de Jong *et al.*, 1997; Aguirre Dávila, 2006; Davalos Sotelo *et al.*, 2008; Libert-Amico y Paz-Pellat, 2018; Paz-Pellat, 2020) con el uso de los mercados de carbono (Williams-Guillén y Otterstrom, 2014).

Por esta razón, este documento tiene como objetivo evaluar los mercados del carbono para los cafetales bajo sombra en la Sierra Madre de Chiapas (México) al establecer una primera aproximación a los beneficios por conservar los almacenes del carbono, ampliando las evaluaciones de los almacenes de carbono en los cafetales bajo sombra y vegetación natural, para considerar un amplio número de trabajos adicionales; además del recientemente realizado por el grupo de investigación (Paz *et al.*, 2022).

MATERIALES Y MÉTODOS

La tipología de cafetales definida por Moguel y Toledo (1999) usa un sistema de clasificación orientado a grandes divisiones: (a) un primer criterio consiste en discriminar entre la existencia o no de la sombra, para establecer el cafetal a pleno sol del resto. (b) el segundo criterio, para los cafetales bajo sombra, consiste en la separación entre mono y policultivos, analizando el número de especies de la sombra y, finalmente (c) un tercer criterio consiste en separar entre policultivos comerciales de policultivos tradicionales o rústicos. Para esto es necesario analizar la composición de árboles no nativos o no originales en la sombra. Los policultivos comerciales tienen una alta proporción de este tipo de árboles. De acuerdo a Moguel y Toledo (1999), los policultivos tradicionales presentan una altura promedio de 20-30 m y los comerciales una altura de no más de 15 m. La abundancia de epífitas puede separar también los policultivos y discriminar a los cafetales rústicos.

Los policultivos tradicionales y rústicos tienen una abundancia de especies de herbáceas que es dos a cuatro veces mayor que las especies arbóreas.

En el caso de cafetales bajo sombra y sus almacenes de carbono, es necesario diferenciar el tipo predominante de la composición arbórea. El uso de especies maderables (*e.g.* cedro, caoba, entre otras) incrementa el valor del almacén de la biomasa viva aérea (Nelson y de Jong, 2003; Soto-Pinto *et al.*, 2006; Espinoza-Domínguez *et al.*, 2012) con relación al uso de árboles leguminosos o frutales.

La tipología de cafetales está circunscrita al axioma de “producir conservando y conservar produciendo” (Moguel y Toledo, 2004; Libert-Amico, 2017), como una estrategia de intervención con orientación a la conservación de la diversidad. El enfoque de paisajes bioculturales integra la diversidad cultural y el manejo (Libert-Amico, 2017) en el análisis de los diferentes tipos de cafetales. La resiliencia socio-ecológica analiza el potencial de transformación socio-ecológico ante eventos de perturbación (Libert-Amico, 2018).

Los tipos de cafetales, sin embargo, se deben analizar más allá de la perspectiva biológica e incluir, entre otras cosas, las dimensiones de sostenibilidad: economía, paisaje y hogar (Toledo y Moguel, 2012).

La tipología de los cafetales bajo sombra mostrada en la Figura 1, propuesta por Moguel y Toledo (1999) y discutida en Escamilla-Prado y Díaz-Cárdenas (2016) y Libert-Amico (2020), tiene cinco tipos de cafetales, donde se han modificado dos de ellos para considerar la sombra de especies forestales y el manejo orgánico. De esta manera, la tipología está definida por: (a) “rústico” o “de montaña”, el cual asemeja a un bosque o selva que ha sido aclarado en su estrato inferior (sotobosque) y sustituido por plantas de café, manteniendo los árboles de sombra originales. (b) “policultivo tradicional” o “jardín de café”. El estrato inferior es sustituido por cafetos y la sombra está compuesta por árboles naturales e introducidos de diferentes usos: especies maderables y frutales, entre otros. (c) “policultivo comercial”. La sombra original es removida totalmente, para generar sombra con dos o tres especies de árboles de tipo comercial y otros para la subsistencia local. La remoción total de la sombra usando árboles introducidos reduce la complejidad estructural y diversidad de la sombra. La sombra puede ser forestal o no forestal (frutales, cítricos, entre otros.) y el manejo puede ser orgánico o no. (d) “monocultivo bajo sombra” o “especializado”. Después de la remoción de la sombra, se plantan

árboles, muchas veces de una sola especie (por ejemplo, *Inga*). La sombra puede ser forestal o no forestal (frutales, cítricos, entre otros) y el manejo puede ser orgánico o no. (e) “monocultivo sin sombra”

o “a pleno sol”. No tiene sombra y está expuesto al sol, en altas densidades de cafetos. Las mayores cosechas de café se obtienen de este sistema.

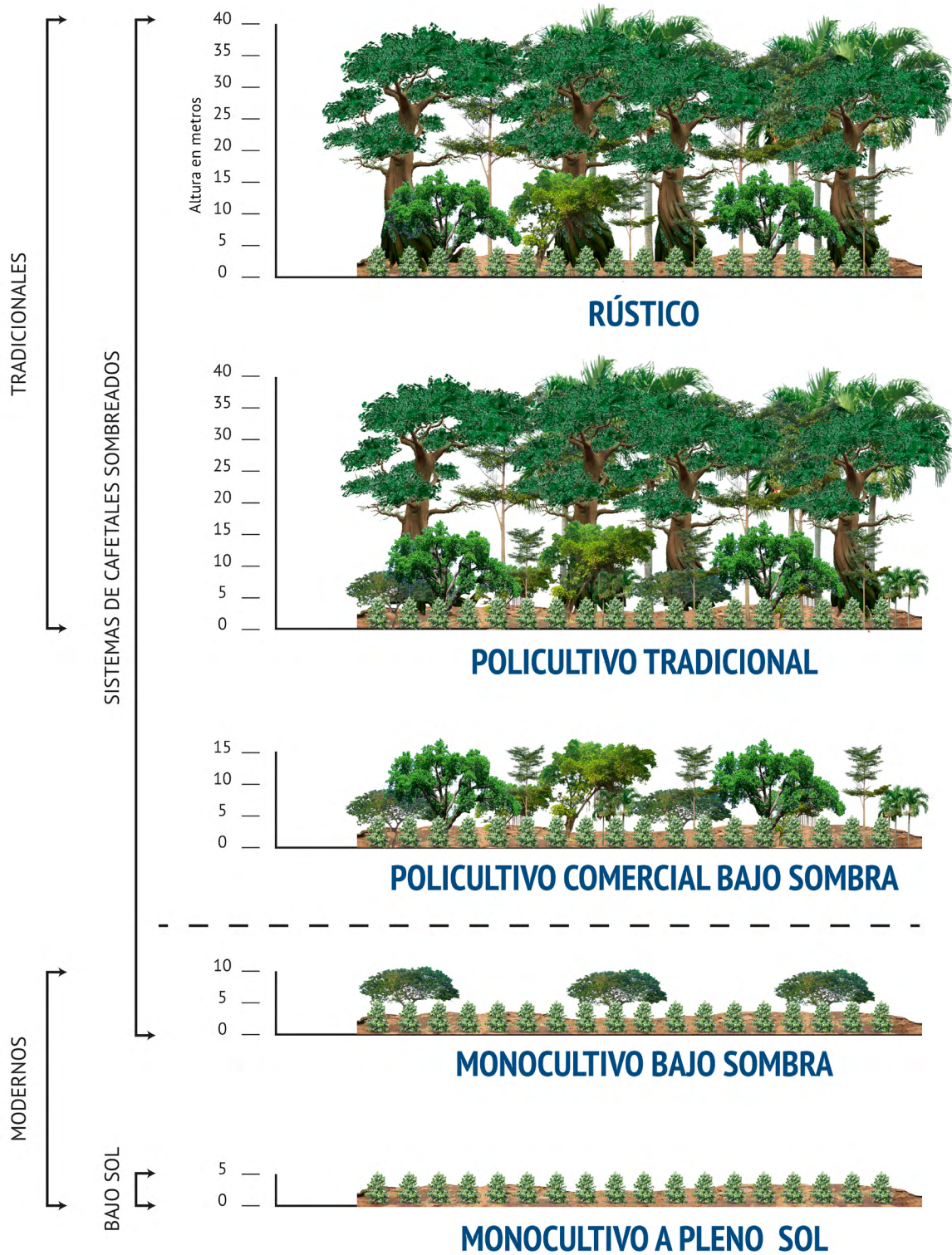


Figura 1. Tipología de cafetales bajo sombra. Adaptado de Moguel y Toledo (1999).

Para evaluar los almacenes de carbono de los cafetales bajo sombra y vegetación natural, se revisó la literatura nacional, principalmente de Chiapas y Veracruz (Nelson y de Jong, 2003; Aguirre Dávila, 2006; Soto-Pinto *et al.*, 2005 y 2006; Roncal, 2006; Aguilar, 2007; Delgadillo y Quechulpa, 2007; Dávalos Sotelo *et al.*, 2008; Jiménez-Ferrer *et al.*, 2008; Roncal-García *et al.*, 2008; Soto-Pinto *et al.*, 2008 y 2010; Espinoza-Domínguez *et al.*, 2012; Vargas Guillén *et al.*, 2012; Orihuela-Belmonte *et al.*, 2013; Soto-Pinto *et al.*, 2013; Valdez-Velarde *et al.*, 2014a y b; Cuevas-Trejo *et al.*, 2014; Masuhara *et al.*, 2015; Soto-Pinto y Aguirre-Dávila, 2015; Soto-Pinto *et al.*, 2015; Villanueva-López *et al.*, 2015; Bautista-Calderón *et al.*, 2016; Raj Aryal *et al.*, 2018; Salgado Mora *et al.*, 2018; Salas-Aguilar *et al.*, 2018; Velázquez-Rodríguez y Paz-Pellat, 2020; Tinoco-Rueda *et al.*, 2021; Tlaxcala-Méndez *et al.*, 2021; Morales-Ruiz *et al.*, 2021). A la par, se revisaron los meta-análisis de los almacenes de carbono en cafetales y otros tipos de uso del suelo (Ávila Vargas, 2000; Morales Coutiño, 2010; Covalada *et al.*, 2012 y 2019; Rikxoort *et al.*, 2014; Libert-Amico y Paz-Pellat, 2018; Soto-Pinto y Jiménez-Ferrer, 2018; Paz-Pellat, 2020; Paz-Pellat *et al.*, 2022).

En términos monetarios, los pagos (valores negativos) por la conservación de un uso del suelo con relación a un cambio específico, estarán dados de acuerdo a los precios recientemente registrados en los mercados voluntarios del carbono. Para estimar los pagos, es necesario convertir los almacenes en Mg C ha⁻¹ a Mg CO₂ ha⁻¹ multiplicando los primeros valores de carbono por un factor relacionado con los pesos moleculares del CO₂ y el C (44/12). El precio de 1 Mg CO₂ que se utilizó en los cálculos fue de \$8.0 dólares (Donofrio *et al.*, 2021), con una conversión de \$ 20.0 pesos por dólar.

RESULTADOS

Los resultados de los análisis realizados en la evaluación de los almacenes de carbono por componentes, de los cafetales bajo sombra y otros usos del suelo, se muestran en el Cuadro 1, a nivel de promedios. No se muestran las métricas de incertidumbre para no sobre cargar con información los cuadros.

Cuadro 1. Almacenes de carbono por componentes, en Mg C ha⁻¹

Uso del suelo	Biomasa aérea viva	Biomasa subterránea viva	Mantillo	Material muerto	Suelo	Total
Selva mediana	105.5	21.3	6.1	3.4	118.3	261.5
Bosque mesófilo	242.2	58.9	9.1	4.7	157.4	472.1
Bosque de pino-encino-liquidámbar	137.2	35.7	9.4	3.5	179.4	365.0
Bosque de pino	91.3	24.9	3.7	2.4	123.4	245.9
Bosque de encino	98.0	26.5	3.2	1.7	115.4	244.7
Bosque de pino-encino	105.9	28.4	8.7	3.2	116.6	262.7
Agricultura de temporal	2.6	1.1	1.6	0.2	75.3	80.8
Agricultura de temporal con labranza de conservación	3.0	1.2	1.7	0.3	82.3	88.5
Agricultura de temporal más árboles dispersos	9.0	3.2	1.9	0.8	98.7	113.6

Cuadro 1. Almacenes de carbono por componentes, en Mg C ha⁻¹ (Continuación).

Uso del suelo	Biomasa aérea viva	Biomasa subterránea viva	Mantillo	Material muerto	Suelo	Total
Maíz intercalado con árboles frutales	15.7	3.0	1.8	0.6	95.4	116.5
Pastizal	2.3	1.0	2.0	0.2	92.1	97.5
Pastizal más árboles dispersos	9.4	3.3	1.8	1.4	97.0	112.8
Pastizal más cercos vivos	13.4	4.6	0.3	1.0	89.7	109.0
Cafetal a pleno sol	8.1	2.9	2.0	2.1	123.4	113.6
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	28.5	8.9	4.8	4.5	111.0	157.7
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	47.7	14.0	3.6	1.3	132.1	198.6
Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	98.7	26.7	6.0	2.7	112.5	246.6
Cafetal policultivo comercial no forestal	34.4	10.5	6.4	3.1	100.2	154.5
Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	39.1	11.7	3.7	2.7	106.8	163.9
Cafetal policultivo comercial forestal	88.6	24.2	6.8	3.4	105.3	228.3
Cafetal policultivo tradicional	49.2	14.4	3.9	3.1	112.3	182.9
Cafetal rústico	60.3	17.2	4.5	1.5	120.2	203.7

Los cambios de los almacenes de carbono que resultan de pasar de un estado inicial (primera columna) a uno final (primer renglón) se muestran en los Cuadros

2 y 3 para el caso de deforestación primaria (de bosques/selvas a cafetales y de bosques/selvas a uso agropecuarios).

Cuadro 2. Cambios del total de C al pasar de bosques/selva a cafetales, en Mg C ha⁻¹.

Uso del suelo	Cafetal a pleno sol	Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	Cafetal policultivo comercial no forestal	Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	Cafetal policultivo comercial forestal	Cafetal policultivo tradicional	Cafetal rústico
C total	113.6	157.7	198.6	246.6	154.5	163.9	228.3	182.9	203.7
Selva mediana	-148.0	-103.8	-62.9	-15.0	-107.0	-97.6	-33.3	-78.6	-57.8
Bosque mesófilo	-358.6	-314.4	-273.5	-225.6	-317.6	-308.2	-243.9	-289.2	-268.4
Bosque de pino-encino-liquidámbar	-251.5	-207.3	-166.4	-118.5	-210.5	-201.2	-136.8	-182.1	-161.4
Bosque de pino	-132.3	-88.2	-47.3	0.6	-91.4	-82.0	-17.6	-63.0	-42.2
Bosque de encino	-131.1	-86.9	-46.0	1.9	-90.1	-80.8	-16.4	-61.7	-41.0
Bosque de pino-encino	-149.1	-105.0	-64.1	-16.1	-108.1	-98.8	-34.4	-79.8	-59.0

Cuadro 3. Cambios del total de C al pasar de bosques/selva a usos agropecuarios, en Mg C ha⁻¹.

Uso del suelo	Agricultura de temporal	Agricultura temporal con labranza de conservación	Agricultura de temporal más árboles dispersos	Maíz intercalado con árboles frutales	Pastizal más árboles dispersos	Pastizal más cercos vivos
C total	80.8	88.5	113.6	116.5	97.5	109.0
Selva mediana	-180.7	-173.0	-148.0	-145.0	-164.0	-152.5
Bosque mesófilo	-391.3	-383.6	-358.6	-355.6	-374.6	-363.2
Bosque de pino-encino-liquidámbar	-284.2	-276.5	-251.5	-248.5	-267.5	-256.1
Bosque de pino	-165.1	-157.4	-132.3	-129.4	-148.4	-136.9
Bosque de encino	-163.8	-156.1	-131.1	-128.2	-147.2	-135.7
Bosque de pino-encino	-181.9	-174.2	-149.1	-146.2	-165.2	-153.7

Los cambios de carbono de los usos del suelo tienen signo negativo para las pérdidas y positivo para las ganancias.

En el Cuadro 4 se muestran los cambios en el total de C para el caso de degradación forestal (cambios en la sombra).

Cuadro 4. Cambios del total de C asociados a los tipos de cafetales (cambios en la sombra), en Mg C ha⁻¹.

Uso del suelo	C	113.6	157.7	198.6	246.6	154.5	163.9	228.3	182.9	203.7
	total									
Cafetal a pleno sol	113.6	0.0	44.1	85.1	133.0	41.0	50.3	114.7	69.4	90.1
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	157.7	-44.1	0.0	40.9	88.9	-3.2	6.2	70.6	25.2	46.0
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	198.6	-85.1	-40.9	0.0	47.9	-44.1	-34.7	29.6	-15.7	5.1
Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	246.6	-133.0	-88.9	-47.9	0.0	-92.0	-82.7	-18.3	-63.6	-42.9
Cafetal policultivo comercial no forestal	154.5	-41.0	3.2	44.1	92.0	0.0	9.3	73.7	28.4	49.1
Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	163.9	-50.3	-6.2	34.7	82.7	-9.3	0.0	64.4	19.0	39.8
Cafetal policultivo comercial forestal	228.3	-114.7	-70.6	-29.6	18.3	-73.7	-64.4	0.0	-45.3	-24.6
Cafetal policultivo tradicional	182.9	-69.4	-25.2	15.7	63.6	-28.4	-19.0	45.3	0.0	20.8
Cafetal rústico	203.7	-90.1	-46.0	-5.1	42.9	-49.1	-39.8	24.6	-20.8	0.0

En el Cuadro 5 se muestran los cambios del contenido de C total al pasar de cafetales a usos agropecuarios.

Cuadro 5. Cambios del total de C de cafetales a usos agropecuarios, en Mg C ha⁻¹.

Uso del suelo	C total	Agricultura de temporal	Agricultura temporal con labranza de conservación	Agricultura de temporal más árboles dispersos	Maíz intercalado con árboles frutales	Pastizal más árboles dispersos	Pastizal más cercos vivos
Cafetal a pleno sol	113.6	-32.7	-25.1	0.0	2.9	-0.7	-4.6
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	157.7	-76.9	-69.2	-44.1	-41.2	-44.9	-48.7
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	198.6	-117.8	-110.1	-85.1	-82.1	-85.8	-89.6
Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	246.6	-165.7	-158.0	-133.0	-130.1	-133.7	-137.6
Cafetal policultivo comercial no forestal	154.5	-73.7	-66.0	-41.0	-38.0	-41.7	-45.6
Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	163.9	-83.1	-75.4	-50.3	-47.4	-51.0	-54.9
Cafetal policultivo comercial forestal	228.3	-147.4	-139.7	-114.7	-111.8	-115.4	-119.3
Cafetal policultivo tradicional	182.9	-102.1	-94.4	-69.4	-66.4	-70.1	-73.9
Cafetal rústico	203.7	-122.9	-115.2	-90.1	-87.2	-90.9	-94.7

En el Cuadro 6 se muestran los pagos totales (\$ pesos ha⁻¹) por conservar los almacenes de carbono en bosques/selvas con relación a su conversión a cafetales.

Cuadro 6. Pagos (valores negativos) por conservar los bosques/selvas con relación a su conversión a cafetales, en pesos.

Uso del suelo	Cafetal a pleno sol	Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	Cafetal policultivo comercial forestal	Cafetal policultivo tradicional	Cafetal rústico		
C total	113.6	157.7	198.6	246.6	154.5	228.3	182.9	203.7		
Selva mediana	261.5	-\$86 802.96	-\$60 911.20	-\$36 904.03	-\$8 785.50	-\$62 760.40	-\$57 282.11	-\$19 515.56	-\$46 109.28	-\$33 928.83
Bosque mesófilo	472.1	-\$210 359.72	-\$184 467.96	-\$160 460.79	-\$132 342.26	-\$186 317.16	-\$180 838.88	-\$143 072.32	-\$169 666.05	-\$157 485.60
Bosque de pino-encino-liquidambar	365.0	-\$147 536.07	-\$121 644.31	-\$97 637.14	-\$69 518.61	-\$123 493.51	-\$118 015.23	-\$80 248.67	-\$106 842.40	-\$94 661.94
Bosque de pino	245.9	-\$77 638.87	-\$51 747.11	-\$27 739.94	\$378.59	-\$53 596.31	-\$48 118.03	-\$10 351.47	-\$36 945.20	-\$24 764.75
Bosque de encino	244.7	-\$76 901.77	-\$51 010.01	-\$27 002.84	\$1 115.69	-\$52 859.21	-\$47 380.93	-\$9 614.37	-\$36 208.10	-\$24 027.64
Bosque de pino-encino	262.7	-\$87 481.32	-\$61 589.56	-\$37 582.39	-\$9 463.86	-\$63 438.76	-\$57 960.48	-\$20 193.92	-\$46 787.65	-\$34 607.19

En el Cuadro 7 se muestran los pagos totales (\$ pesos ha⁻¹) por conservar bosques/selvas con relación a usos agropecuarios, con diferentes tipos de manejo.

Cuadro 7. Pagos (valores negativos) por conservar los bosques/selvas con relación a su conversión a usos agropecuarios, en pesos.

Uso del suelo	Agricultura de temporal	Agricultura de temporal con labranza de conservación	Agricultura de temporal de más árboles dispersos	Maíz intercalado con árboles frutales	Pastizal	Pastizal más árboles dispersos	Pastizal más cercos vivos
C total	80.8	88.5	113.6	116.5	97.5	112.8	109.0
Selva mediana	-\$106 015.71	-\$101 500.12	-\$86 802.96	-\$85 082.70	-\$96 229.35	-\$87 228.69	-\$89 492.36
Bosque mesófilo	-\$229 572.48	-\$225 056.88	-\$210 359.72	-\$208 639.47	-\$219 786.12	-\$210 785.46	-\$213 049.12
Bosque de pino-encino-liquidambar	-\$166 748.83	-\$162 233.23	-\$147 536.07	-\$145 815.81	-\$156 962.47	-\$147 961.81	-\$150 225.47
Bosque de pino	-\$96 851.63	-\$92 336.03	-\$77 638.87	-\$75 918.62	-\$87 065.27	-\$78 064.61	-\$80 328.28
Bosque de encino	-\$96 114.53	-\$91 598.93	-\$76 901.77	-\$75 181.51	-\$86 328.17	-\$77 327.50	-\$79 591.17
Bosque de pino-encino	-\$106 694.08	-\$102 178.48	-\$87 481.32	-\$85 761.06	-\$96 907.72	-\$87 907.06	-\$90 170.72

Para el caso de pagos totales por degradación forestal (cambios en la sombra de los cafetales), el Cuadro 8 muestra los valores.

Cuadro 8. Pagos totales (valores negativos) por degradación forestal (cambios en la sombra de los cafetales), en pesos.

Uso del suelo	Cafetal a pleno sol	Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	Cafetal policultivo comercial no forestal	Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	Cafetal policultivo comercial forestal	Cafetal policultivo tradicional	Cafetal rústico
C total	113.6	157.7	198.6	246.6	154.5	163.9	228.3	182.9	203.7
Cafetal a pleno sol	\$0.00	\$25 891.76	\$49 898.93	\$78 017.46	\$24 042.56	\$29 520.84	\$67 287.40	\$40 693.67	\$52 874.12
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	-\$25 891.76	\$0.00	\$24 007.17	\$52 125.70	-\$1 849.20	\$3 629.08	\$41 395.64	\$14 801.92	\$26 982.37
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	-\$49 898.93	-\$24 007.17	\$0.00	\$28 118.53	-\$25 856.37	-\$20 378.09	\$17 388.47	-\$9 205.26	\$2 975.20
Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	-\$78 017.46	-\$52 125.70	-\$28 118.53	\$0.00	-\$53 974.90	-\$48 496.62	-\$10 730.06	-\$37 323.79	-\$25 143.34
Cafetal policultivo comercial no forestal	-\$24 042.56	\$1 849.20	\$25 856.37	\$53 974.90	\$0.00	\$5 478.28	\$43 244.84	\$16 651.12	\$28 831.57
Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	-\$29 520.84	-\$3 629.08	\$20 378.09	\$48 496.62	-\$5 478.28	\$0.00	\$37 766.56	\$11 172.83	\$23 353.28
Cafetal policultivo comercial forestal	-\$67 287.40	-\$41 395.64	-\$17 388.47	\$10 730.06	-\$43 244.84	-\$37 766.56	\$0.00	-\$26 593.73	-\$14 413.27
Cafetal policultivo tradicional	-\$40 693.67	-\$14 801.92	\$9 205.26	\$37 323.79	-\$16 651.12	-\$11 172.83	\$26 593.73	\$0.00	\$12 180.45
Cafetal rústico	-\$52 874.12	-\$26 982.37	-\$2 975.20	\$25 143.34	-\$28 831.57	-\$23 353.28	\$14 413.27	-\$12 180.45	\$0.00

En el Cuadro 9 se muestran los pagos totales por conservar los cafetales con relación a los usos agropecuarios con distintos manejos.

Cuadro 9. Pagos totales (valores negativos) por conservar los cafetales con relación a los usos agropecuarios con distintos manejos, en pesos.

Uso del suelo	C	Agricultura de temporal	Agricultura de temporal con labranza de conservación	Agricultura de temporal más árboles dispersos	Maíz intercalado con árboles frutales	Pastizal	Pastizal más árboles dispersos	Pastizal más cercos vivos
C total	80.8	88.5	113.6	116.5	97.5	112.8	109.0	
Cafetal a pleno sol	113.6	-\$19 212.76	-\$14 697.16	\$0.00	\$1 720.25	-\$9 426.40	-\$425.74	-\$2 689.40
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	157.7	-\$45 104.52	-\$40 588.92	-\$25 891.76	-\$24 171.50	-\$35 318.16	-\$26 317.49	-\$28 581.16
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	198.6	-\$69 111.69	-\$64 596.09	-\$49 898.93	-\$48 178.67	-\$59 325.33	-\$50 324.67	-\$52 588.33
Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	246.6	-\$97 230.22	-\$92 714.62	-\$78 017.46	-\$76 297.21	-\$87 443.86	-\$78 443.20	-\$80 706.86
Cafetal policultivo comercial no forestal	154.5	-\$43 255.32	-\$38 739.72	-\$24 042.56	-\$22 322.30	-\$33 468.96	-\$24 468.29	-\$26 731.96
Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	163.9	-\$48 733.60	-\$44 218.00	-\$29 520.84	-\$27 800.59	-\$38 947.24	-\$29 946.58	-\$32 210.24
Cafetal policultivo comercial forestal	228.3	-\$86 500.16	-\$81 984.56	-\$67 287.40	-\$65 567.14	-\$76 713.80	-\$67 713.13	-\$69 976.80
Cafetal policultivo tradicional	182.9	-\$59 906.43	-\$55 390.84	-\$40 693.67	-\$38 973.42	-\$50 120.07	-\$41 119.41	-\$43 383.08
Cafetal rústico	203.7	-\$72 086.88	-\$67 571.29	-\$52 874.12	-\$51 153.87	-\$62 300.52	-\$53 299.86	-\$55 563.53

La iniciativa de Banco Mexicano del Carbono (Paz-Pellat, 2022a) del carbono es el pago anual por servicios ambientales de la Comisión plantea pagos anuales con el uso del concepto “ton-años”, donde los Nacional Forestal (DOF, 2021), el cual se estableció en \$ 1100 pesos por pagos anuales van del 0.9% al 3.2% del total (Paz-Pellat, 2022a), por lo hectárea.

El Cuadro 10 muestra los pagos anuales (3.2% del pago total) por que se puede utilizar el pago máximo para evaluar los pagos anuales. Una conservación de bosques/selvas con relación a su conversión a cafetales. referencia para comparar los pagos anuales por conservar los almacenes

Cuadro 10 Pagos anuales (valores negativos) por conservar los bosques/selvas con relación a su conversión a cafetales, en pesos.

Uso del suelo	Cafetal a pleno sol	Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	Cafetal policultivo comercial no forestal	Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	Cafetal policultivo comercial forestal	Cafetal policultivo tradicional	Cafetal rústico
C total	113.6	157.7	198.6	246.6	154.5	163.9	228.3	182.9	203.7
Selva mediana	261.5	-\$2 777.69	-\$1 949.16	-\$281.14	-\$2 008.33	-\$1 833.03	-\$624.50	-\$1 475.50	-\$1 085.72
Bosque mesófilo	472.1	-\$6 731.51	-\$5 902.97	-\$4 234.95	-\$5 962.15	-\$5 786.84	-\$4 578.31	-\$5 429.31	-\$5 039.54
Bosque de pino-encino-liquidámbar	365.0	-\$4 721.15	-\$3 892.62	-\$2 224.60	-\$3 951.79	-\$3 776.49	-\$2 567.96	-\$3 418.96	-\$3 029.18
Bosque de pino	245.9	-\$2 484.44	-\$1 655.91	\$12.11	-\$1 715.08	-\$1 539.78	-\$331.25	-\$1 182.25	-\$792.47
Bosque de encino	244.7	-\$2 460.86	-\$1 632.32	\$35.70	-\$1 691.49	-\$1 516.19	-\$307.66	-\$1 158.66	-\$768.88
Bosque de pino-encino	262.7	-\$2 799.40	-\$1 970.87	-\$302.84	-\$2 030.04	-\$1 854.74	-\$646.21	-\$1 497.20	-\$1 107.43

En el Cuadro 11 se muestran los pagos anuales por conservación de bosques/selvas con relación a su conversión a usos agropecuarios con diferentes manejos.

Cuadro 11. Pagos anuales (valores negativos) por conservar los bosques/selvas con relación a su conversión a usos agropecuarios con diferentes manejos, en pesos.

Uso del suelo	Agricultura de temporal	Agricultura de temporal con labranza de conservación	Agricultura de temporal más árboles dispersos	Maíz intercalado con árboles frutales	Pastizal más árboles dispersos	Pastizal más cercos vivos
C total	80.8	88.5	113.6	116.5	97.5	109.0
Selva mediana	-3 392.50	-3 248.00	-2 777.69	-2 722.65	-3 079.34	-2 791.32
Bosque mesófilo	-7 346.32	-7 201.82	-6 731.51	-6 676.46	-7 033.16	-6 745.13
Bosque de pino-encino-liquidámbar	-5 335.96	-5 191.46	-4 721.15	-4 666.11	-5 022.80	-4 734.78
Bosque de pino	-3 099.25	-2 954.75	-2 484.44	-2 429.40	-2 786.09	-2 498.07
Bosque de encino	-3 075.66	-2 931.17	-2 460.86	-2 405.81	-2 762.50	-2 474.48
Bosque de pino-encino	-3 414.21	-3 269.71	-2 799.40	-2 744.35	-3 101.05	-2 813.03

Para el caso de la degradación forestal (cambios en la sombra de los cafetales), el Cuadro 12 se muestran los pagos anuales.

Cuadro 12. Pagos anuales (valores negativos) por cambios en la sombra de los cafetales, en pesos.

Uso del suelo	Cafetal a pleno sol	Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	Cafetal policultivo comercial no forestal	Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	Cafetal policultivo comercial forestal	Cafetal policultivo tradicional	Cafetal rústico
C total	113.6	157.7	198.6	246.6	154.5	163.9	228.3	182.9	203.7
Cafetal a pleno sol	\$0.00	\$828.54	\$1 596.77	\$2 496.56	\$769.36	\$944.67	\$2 153.20	\$1 302.20	\$1 691.97
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	-\$828.54	\$0.00	\$768.23	\$1,668.02	-\$59.17	\$116.13	\$1 324.66	\$473.66	\$863.44
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	-\$1 596.77	-\$768.23	\$0.00	\$899.79	-\$827.40	-\$652.10	\$556.43	-\$294.57	\$95.21
Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	-\$2 496.56	-\$1 668.02	-\$899.79	\$0.00	-\$1 727.20	-\$1 551.89	-\$343.36	-\$1 194.36	-\$804.59
Cafetal policultivo comercial no forestal	-\$769.36	\$59.17	\$827.40	\$1 727.20	\$0.00	\$175.31	\$1 383.83	\$532.84	\$922.61
Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	-\$944.67	-\$116.13	\$652.10	\$1 551.89	-\$175.31	\$0.00	\$1 208.53	\$357.53	\$747.31
Cafetal policultivo comercial forestal	-\$2 153.20	-\$1 324.66	-\$556.43	\$343.36	-\$1 383.83	-\$1 208.53	\$0.00	-\$851.00	-\$461.22
Cafetal policultivo tradicional	-\$1 302.20	-\$473.66	\$294.57	\$1 194.36	-\$532.84	-\$357.53	\$851.00	\$0.00	\$389.77
Cafetal rústico	-\$1 691.97	-\$863.44	-\$95.21	\$804.59	-\$922.61	-\$747.31	\$461.22	-\$389.77	\$0.00

Para el caso de los pagos anuales por cambios de cafetales a usos agropecuarios con diferentes manejos, el Cuadro 13 muestra los valores.
Cuadro 13. Pagos (valores negativos) por conservar los cafetales con relación a los usos agropecuarios con distintos manejos, en pesos.

Uso del suelo	Agricultura de temporal	Agricultura de temporal con labranza de conservación	Agricultura de temporal con más árboles dispersos	Maíz intercalado con árboles frutales	Pastizal	Pastizal más árboles dispersos	Pastizal más cercos vivos
C total	80.8	88.5	113.6	116.5	97.5	112.8	109.0
Cafetal a pleno sol	-\$614.81	-\$470.31	\$0.00	\$55.05	-\$301.64	-\$13.62	-\$86.06
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal	-\$1 443.34	-\$1 298.85	-\$828.54	-\$773.49	-\$1 130.18	-\$842.16	-\$914.60
Cafetal monocultivo bajo sombra no forestal orgánico	-\$2 211.57	-\$2 067.07	-\$1 596.77	-\$1 541.72	-\$1 898.41	-\$1 610.39	-\$1 682.83
Cafetal monocultivo bajo sombra forestal	-\$3 111.37	-\$2 966.87	-\$2 496.56	-\$2 441.51	-\$2 798.20	-\$2 510.18	-\$2 582.62
Cafetal policultivo comercial no forestal	-\$1 384.17	-\$1 239.67	-\$769.36	-\$714.31	-\$1 071.01	-\$782.99	-\$855.42
Cafetal policultivo comercial no forestal orgánico	-\$1 559.48	-\$1 414.98	-\$944.67	-\$889.62	-\$1 246.31	-\$958.29	-\$1 030.73
Cafetal policultivo comercial forestal	-\$2 768.00	-\$2 623.51	-\$2 153.20	-\$2 098.15	-\$2 454.84	-\$2 166.82	-\$2 239.26
Cafetal policultivo tradicional	-\$1 917.01	-\$1 772.51	-\$1 302.20	-\$1 247.15	-\$1 603.84	-\$1 315.82	-\$1 388.26
Cafetal rústico	-\$2 306.78	-\$2 162.28	-\$1 691.97	-\$1 636.92	-\$1 993.62	-\$1 705.60	-\$1 778.03

DISCUSIÓN

Los métodos de muestreo del carbono en los bosques/selvas del país se han estandarizado (CONAFORW 2009), así como los métodos de estimación de los almacenes de carbono (IPCC, 2003 y 2006). No obstante, numerosos autores que han evaluado los almacenes de carbono usan métodos diferentes a los estandarizados, tanto para el muestreo como para la estimación del carbono, lo que hace difícil la integración de las estimaciones.

Para el caso de los almacenes de carbono de la biomasa aérea viva, el uso de diferentes modelos alométricos (e.g. Brown *et al.*, 1997 y Rojas-García *et al.*, 2015) produce diferentes valores de los almacenes estimados de carbono. En el caso del carbono orgánico de los suelos, la corrección o no por fragmentos gruesos del suelo (>2 mm) produce resultados diferentes en los valores estimados del carbono (Poeplau *et al.*, 2017).

Una aproximación a la variación (desviación estándar) de los promedios se basa en la relación promedio y desviación estándar de los usos del suelo (Covaleta *et al.*, 2012 y 2019):

Biomasa aérea viva (Mg C ha⁻¹):

$$Desv.Est. = 1.5295 + 0.3503Promedio \quad (1)$$

Biomasa subterránea viva (Mg C ha⁻¹):

$$Desv.Est. = 0.5130 + 0.8163Promedio \quad (2)$$

donde la biomasa subterránea viva se estima de acuerdo a Cairns *et al.* (1997).

Mantillo (Mg C ha⁻¹):

$$Desv.Est. = 0.2459 + 0.4125Promedio \quad (3)$$

Material leñoso muerto (Mg C ha⁻¹):

$$Desv.Est. = -0.3921 + 1.9428Promedio \quad (4)$$

Suelo (Mg C ha⁻¹):

$$Desv.Est. = -42.132 + 0.7959Promedio \quad (5)$$

A pesar del conocimiento de la desviación estándar, no es posible estimar el intervalo de confianza al no contar con los valores del número de muestras en las diferentes estimaciones de los promedios.

Los resultados de los pagos anuales por conservación y no conversión plantean valores mayores a los pagos por servicios ambientales de la CONAFOR, lo que hace que la estrategia sea competitiva, aunque hay casos con pagos menores o nulos (valores positivos). No obstante, los valores estimados pueden usarse como una referencia para los pagos anuales.

Para los pagos de anualidades (periodo de 20 a 30 años), la referencia del pago de la CONAFOR permite analizar su relevancia e impacto en la conservación de los almacenes de carbono.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La valoración de los cambios en los almacenes de carbono asociados a la conservación o cambios de los usos del suelo permite la estimación de los pagos totales o anuales que pueden recibir los productores de acuerdo a sus estrategias de cambios y manejos. La referencia del pago por servicios ambientales de la CONAFOR establece un plano de comparación del impacto de los pagos anuales.

La implementación de la estrategia de conservación de los almacenes de carbono del Banco Mexicano del Carbono puede generar incentivos financieros generalmente mayores a los pagos por servicios ambientales de la CONAFOR, aunque en algunos casos estos son menores o nulos. Los pagos anuales por conservación son competitivos.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo a través del FORDECYT-PRONACES para realizar este trabajo mediante el financiamiento al proyecto 319069 “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas”

LITERATURA CITADA

- Aguilar, V. 2007. Servicios ambientales: captura de carbono en sistemas de café bajo sombra Chiapas, México. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México 90 p.
- Aguirre Dávila, C. M. 2006. Servicios ambientales: captura de carbono en sistemas de café bajo sombra en Chiapas, México. Tesis de Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sustentable. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México 84 p.
- Angelsen, A., C. Martius, V. De Sy, A. E. Duchelle, A. M. Larson and P. T. Thuy (eds.). 2021. REDD+: La Transformación. Lecciones y Nuevas Direcciones. CIFOR. Bogor, Indonesia.
- Avelino, J., M. Cristancho, S. Georgiou, P. Imbach, L. Aguilar, G. Bornemann, P. Läderach, F. Anzueto, A. J. Hruska and C. Morales. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008-2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Sec.* 7:303-321.
- Ávila Vargas, G. 2000. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol. Tesis de Maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE, Turrialba, Costa Rica 99 p.
- Bautista-Calderón, E. A., V. M. Ordaz-Chaparro, E. V. Gutiérrez-Castorena, C. Hidalgo-Moreno y E. Valdés-Velarde. 2016. Carbono en sistemas agroforestales de café, bosque mesófilo de montaña y potrero en Huatusco, Veracruz. pp. 454-461. En: F. Paz Pellat y R. Torres Alamilla (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2016*. Texcoco, Estado de México, México.
- Bolaños-González, M. A., A. Libert-Amico, F. Paz-Pellat, V. Salas-Aguilar, G. Villalobos-Sánchez, E. Escamilla-Prado, A. S. Velázquez-Rodríguez y E. I. Morales-Reyes. 2021. Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas. pp. 633-638. En: J. M. Hernández, M. Manzano, M. Bolaños y P. Ibarra (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2021*. Texcoco, Estado de México, México.
- Brown, S., P. Schroeder, and R. Birdsey. 1997. Aboveground biomass distribution of US eastern hardwood forests and the use of large trees as an indicator of forest development. *For. Ecol. Manage.* 96: 37-47.
- Cairns, M., S. Brown, E. H. Helmer, and G. A. Baumgardner. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111: 1-11.
- CEDRSSA. 2019. Propuestas para reactivar la producción y comercialización de café en México 2019-2024. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, Cámara de Diputados - LXIV Legislatura 19 p.
- CONAFOR. 2009. Manual y Procedimientos para el Muestreo de Campo (Re-Muestreo 2009). Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Comisión Nacional Forestal. Guadalajara, Jalisco, México 140 p.
- CONAFOR. 2017a. Estrategia Nacional para REDD+ (ENAREDD+). Comisión Nacional Forestal. Jalisco 107 p.
- CONAFOR. 2017b. Iniciativa de Reducción de Emisiones (IRE). Comisión Nacional Forestal. Jalisco.
- Covaleda, S., F. Paz y B. de Jong. 2012. Parametrización de modelos de estados y transiciones para el carbono y caracterización de la incertidumbre. pp. 29-34. En: Paz, F., M. Bazán y V. Saynes (eds.). *Dinámica del Carbono en el Suelo 2012. Serie Avances Temáticos del Ciclo del Carbono y sus Interacciones. Programa Mexicano del Carbono*. Texcoco, Estado de México, México.
- Covaleda-Ocón, S., F. Paz-Pellat y B. de Jong. 2019. Modelos de estados y transiciones para los almacenes de carbono de las principales regiones de Chiapas, México. *Elementos para Políticas Públicas* 3:183-221.
- Cuevas-Trejo, S., M. López-Velasco, E. Valdés-Velarde, V. Ordaz-Chaparro, J. Ayala-Arreola, L. Krishnamurthy, E. Salcedo-Pérez, J. F. Gallardo-Lancho y J. I. Valdez-Hernández. 2014. Contenido de carbono en sistemas agroforestales de café en tres municipios de la región de "Las Montañas" (Veracruz, México). pp. 71-77. En: F. Paz Pellat y J. Wong González (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014*. Texcoco, Estado de México, México.
- Dávalos Sotelo, R., M. I. Rodríguez Morato y E. Martínez Piniillos-Cueto. 2008. Almacenamiento de carbono. pp. 223-233. En: R. H. Manson, V. Hernández-Ortiz, S. Gallina y K. Mehltreter (eds.). *Agroecosistemas Cafetaleros de Veracruz: Biodiversidad, Manejo y Conservación*. INECOL e INE-SEMARNAT, México.
- de Jong, B., L. Soto, G. Montoya, K. Nelson, J. Taylor and R. Tipper. 1997. Forestry and agroforestry alternatives for carbon mitigation: an analysis from Chiapas, Mexico. pp. 263-284. *In: W. Adger, D. Pettenella and M. C. Whitby (eds). Climate Change Mitigation and European Land Use Policies*. CAB International. Wallingford, UK
- Delgadillo, M. y S. Quechulpa. 2007. Inventario de Carbono y Caracterización de Tres Sistemas Agroforestales en Localidades de los Municipios Salto de Agua, Chilón y Comitán del Estado de Chiapas, México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México 95 p.
- D.O.F. 2021. Reglas de Operación del Programa Apoyos para el Desarrollo Forestal Sustentable 2022. Diario Oficial de la Federación del 28/12/2021.

- Donofrio, S., P. Maguire, K. Myers, C. Daley and K. Lin. 2021. State of the Voluntary Carbon Markets 2021. Ecosystem Market Place Insights Report. Washington, DC. 40 p.
- Escamilla Prado, E. y S. Díaz Cárdenas. 2016. Sistemas de Cultivo de Café en México. Centro Nacional de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico del Café. Huatusco, Veracruz 61 p.
- Espinoza-Domínguez, W., L. Krishnamurthy, A. Vázquez-Alarcón y A. Torres-Rivera. 2012. Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 18:57-70.
- Harvey, C. A., A. A. Pritts, M. J. Zwetsloot, K. Jansen, M. M. Puller, I. Armbrrecht, J. Avelino, J. F. Barrera, C. Bunn, J. Hoyos García, C. Isaza, J. Muñoz-Ucros, C. J. Pérez-Alemán, E. Rahn, V. Robiglio, E. Somarriba and V. Valencia. 2021. Transformation of coffee-growing landscapes across Latin America. A Review. *Agronomy for Sustainable Development*. Doi:10.1007/s13593-021-00712-0.
- Hernández-Martínez, G. 2008. Clasificación agroecológica pp. 15-34. En: R. H. Manson, V. Hernández-Ortiz, S. Gallina y K. Mehlreter (eds.). *Agroecosistemas Cafetaleros de Veracruz: Biodiversidad, Manejo y Conservación*. Instituto de Ecología A.C. – INECOL e Instituto Nacional de Ecología – SEMARNAT. México.
- IPCC. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Edited by Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe and Fabian Wagner. Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC.
- IPCC. 2006. Agriculture, forestry and other land use IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe (eds.). Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan.
- Jiménez-Ferrer, G. A. V. Aguilar and L. Soto-Pinto. 2008. Livestock and carbon sequestration in the Lacandon rainforests, Chiapas, Mexico. pp. 195-197. In: P. Rowlinson, M. Steele and A. Nefzaoui (eds.). *Proceedings International Conference Livestock and Global Climate Change 2008*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Libert-Amico, A. 2017. Paisajes bioculturales ante el cambio climático: carbono y agrobiodiversidad en cafetales bajo sombra en Chiapas. pp. 94-99. En: F. Paz, R. Torres y A. Velázquez (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2017*. Texcoco, Estado de México, México.
- Libert-Amico, A. 2018. Resiliencia socio-ecológica ante la crisis del café en la Sierra Madre de Chiapas, México. pp. 149-155. En: F. Paz, A. Velázquez y M. Rojo (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2018*. Texcoco, Estado de México, México.
- Libert-Amico, A. 2020. La clasificación de sistemas agroforestales: las contribuciones del café bajo sombra a la sustentabilidad. pp. 65-71. En: J. M. Hernández, M. Rojo, M. Fuentes, A. Velázquez y M. Bolaños (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2020*. Texcoco, Estado de México, México.
- Libert-Amico, A., C. Ituarte-Lima and T. Elmqvist. 2020. Learning from social-ecological crisis for legal resilience building: multi-scale dynamics in the coffee rust epidemic. *Sustainability Science* 15:485-501.
- Libert-Amico, A. y F. Paz-Pellat. 2018. Del papel a la acción en la mitigación y adaptación al cambio climático: la roya del cafeto en Chiapas. *Madera y Bosques*. doi:10.21829/myb.2018.2401914.
- Libert-Amico, A., J. C. Wong-González y F. Paz-Pellat. 2016. Impacto de la roya del cafeto en los almacenes de carbono en la Sierra Madre de Chiapas. pp. 219-225. En: F. Paz y R. Torres (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2016*. Texcoco, Estado de México, México.
- Masuhara, A., E. Valdéz, J. Pérez, D. Gutiérrez, J. C. Vázquez, E. Salcedo, M. J. Juárez y A. Merino. 2015. Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Amazónica de Ciencia y Tecnología* 4:69-93.
- Moguel, P. and V. M. Toledo. 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology* 13:11-21.
- Moguel, P. y V. M. Toledo. 2004. Conservar produciendo: biodiversidad, café orgánico y jardines productivos. *Biodiversitas* 55:2-7.
- Morales Coutiño, T. A. 2010. Carbono en Sistemas Ganaderos en un Paisaje de Conservación REBIMA Chiapas, México. Tesis de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural. El Colegio de la Frontera Sur. San Cristóbal de las Casas, Chiapas. 61 p.
- Morales-Ruiz, D. E., R. Aryal-Deb, R. Pinto-Ruiz, F. Guevara-Hernández, F. Casanova-Lugo, G. Villanueva-López, J. A. Venegas-Venegas, M. Reyes-Soto y J. C. López-Hernández. 2021. Almacenamiento y tasa de acumulación de carbono en sistemas silvopastoriles en Chiapas, México. pp. 577-582. En: J. M. Hernández, M. Manzano, M. Bolaños y P. Ibarra (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2021*. Texcoco, Estado de México, México.
- Natzler, B., D. Jameson, R. Gregg, C. Stark, M. Thompson and V. Scott. 2022. Voluntary Carbon Markets and Offsetting. *Climate Change Committee*. Westminster, U.K. 102 p.

- Nelson, K. C. and B. H. J. de Jong. 2003. Making global initiatives local realities: carbon mitigation projects in Chiapas, Mexico. *Global Environmental Change* 13:19-30.
- Nolasco, M. 1985. *Café y sociedad en México*. Centro de Ecodesarrollo. D.F., México 454 p.
- Orihuela-Belmonte, E., B. H. J. de Jong, J. Mendoza-Vega, J. Van der Wal, F. Paz-Pellat, L. Soto-Pinto y A. Flamenco-Sandoval. 2013. Carbon stocks and accumulation rates in tropical secondary forests at the scale of community, landscape and forest type. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 171:72-84.
- Paz-Pellat, F. 2020. Costo de las políticas públicas asociadas al manejo de la roya en los cafetales bajo sombra de la Sierra Madre de Chiapas pp. 81-86. En: J. M. Hernández, M. Rojo, M. Fuentes, A. Velázquez y M. Bolaños (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2020*. Texcoco, Estado de México, México.
- Paz-Pellat, F. 2022a. Iniciativa del banco mexicano del carbono: elementos constitutivos y rasgos principales. *Elementos para Políticas Públicas* 6(1):1-12.
- Paz-Pellat, F. 2022b. Derechos del carbono y servicios ambientales: la doble negación. *Elementos para Políticas Públicas* 6(1):13-20.
- Paz, F., V. Salas, C. Sánchez, A. Libert y M. A. Bolaños. 2022. Caracterización de los almacenes de carbono, estructura y diversidad de los cafetales bajo sombra y vegetación natural en la Sierra Madre de Chiapas. *Elementos para Políticas Públicas* 6(2):101-121
- Perfecto, I., M. E. Jiménez-Soto and J. Vandermeer. 2019. Coffee landscapes shaping the Anthropocene, forced simplification on a complex agroecological landscape. *Current Anthropology*. doi: 10.1086/703413.
- Perfecto, I., J. Vandermeer, A. Mas and L. Soto Pinto. 2005. Biodiversity, yield, and shade coffee certification. *Ecological Economics* 54:435-446.
- Pineda-López, M. R., G. Ortiz-Ceballos y L. R. Sánchez-Velázquez. 2005. Los cafetales y su papel en la captura de carbono: un servicio Ambiental aún no valorado en Veracruz. *Madera y Bosques* 11:3-14.
- Poeplau, C., C. Vos and A. Don. 2017. Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameter's bulk density and rock fragment content. *Soil* 3:61-66.
- Raj Aryal, D., H. Gómez Castro, N. del Carmen García, O. J. José Ruiz, L. F. Molina Paniagua, J. A. Jiménez Trujillo, J. A. Venegas Venegas, R. Pinto Ruiz, A. Ley de Coss y F. Guevara Hernández. 2018. Potencial de almacenamiento de carbono en áreas forestales en un sistema ganadero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* doi:10.29298/rmcf.v48ii48.184.
- Rikxoort, G. Schroth, P. Läderach and B. Rodríguez-Sánchez. 2014. Carbon footprints and carbon stocks reveal climate-friendly coffee production. *Agron. Sustain. Dev.* 34:887-897.
- Rojas-García, F., B. H. J. De Jong, P. Martínez-Zurimendi y F. Paz-Pellat. 2015. Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science* 72:835-864.
- Roncal, S. 2006. Almacenamiento de carbono y complejidad de sistemas agroforestales en comunidades indígenas de Chiapas, México. Tesis de Maestría. El Colegio de la Frontera Sur. San Cristóbal de las Casas, Chiapas 51 p.
- Roncal-García, L. Soto-Pinto, J. Castellanos-Albores, N. Ramírez-Marcial y B. H. J. de Jong. 2008. Sistemas agroforestales y almacenamiento de carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México. *Interciencia* 33:200-206.
- SAGARPA. 2017. Cierre de la producción agrícola. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México: SAGARPA. Recuperado de <http://infosiap.siap.gob.mx>.
- Salas-Aguilar, V. M., F. Paz-Pellat, F. Rojas-García y M. Bolaños. 2018. Almacenes de carbono en sistemas agroforestales cafetaleros de la Sierra Madre de Chiapas pp. 671-677. En: F. Paz, A. Velázquez y M. Rojo (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2018*. Texcoco, Estado de México, México.
- Salgado Mora, M. G., C. Ruiz-Bello, J. L. Moreno-Martínez, B. Irena-Martínez y J. F. Aguirre-Medina. 2018. Captura de carbono en biomasa aérea de árboles de sombra asociados a *Coffea arabica* L. en el Soconusco Chiapas, México. *Agro Productividad* 11:120-126.
- Soto-Pinto, L. and C. M. Aguirre-Dávila. 2015. Carbon stocks in organic coffee systems in Chiapas, Mexico. *Journal of Agricultural Science* 7:117-128.
- Soto-Pinto, L., C. M. Aguirre-Dávila y M. J. Anzueto-Martínez. 2015. Almacenes de carbono en cafetales con distintos manejos en el Norte de Chiapas, México. pp. 256-263. En: F. Paz Pellat, J. Wong González y R. Torres Alamilla (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015*. Texcoco, Estado de México, México.
- Soto-Pinto, L., M. Anzueto, J. Mendoza, G. Jiménez Ferrer and B. de Jong. 2010. Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforest. Syst.* 78:39-51.
- Soto Pinto, L., C. Armijo Florentino y M. Anzueto Martínez. 2013. La Milpa con Árboles Ixim 'Te Taungya, Un Producto Agroforestal. ECOSUR y redISA. San Cristobal de las Casa, Chiapas, México 25 p.
- Soto Pinto, L., B. H. J. de Jong, E. Esquivel Bazán y S. Quechulpa. 2006. Potencial ecológico de captura de carbono en cafetales. pp. 373-380. En: J. Pohlan, L. Soto y Barrera (eds.). *El Cafetal del Futuro, Realidades y Visiones*. Shaker Verlag, Germany.

- Soto-Pinto, L. y G. Jiménez-Ferrer. 2018. Contradicciones socio-ambientales en los procesos de mitigación asociados al ciclo del carbono en sistemas agroforestales. *Madera y Bosques* doi:10.21829/myb.2018.2401887.
- Soto Pinto, L., G. Jiménez Ferrer y T. Lerner Martínez. 2008. Diseño de Sistemas Agroforestales para la Producción y la Conservación, Experiencia y Tradición en Chiapas. El Colegio de la Frontera Sur, San Cristóbal de las Casas, Chiapas. 90 p.
- Soto-Pinto, L., G. Jiménez-Ferrer, A. Vargas Guillén. B. de Jong Bergsma y E. Esquivel-Bazán. 2005. Experiencia agroforestal para la captura de carbono en comunidades indígenas de México. *Revista Forestal Iberoamericana* 1:44-49.
- Tinoco-Rueda, J. A., E. Escamilla-Prado y M. Flores-Ordoñez. 2021. Almacenamiento de carbono orgánico del suelo en cafetales orgánicos del centro de Veracruz, México. pp. 605-608. En: J. M. Hernández, M. Manzano, M. Bolaños y P. Ibarra (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2021. Texcoco, Estado de México, México.
- Tlaxcala-Méndez, R. M., M. C. Pablo-Mendoza, M. Aquino-Ramírez, O. Santiago-Trinidad y N. López-Vázquez. 2021. Cuantificación del almacén de biomasa y carbono aéreo en un cafetal bajo sombra diversificada. pp. 599-604. En: J. M. Hernández, M. Manzano, M. Bolaños y P. Ibarra (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2021. Texcoco, Estado de México, México.
- Toledo, V. M. and P. Moguel. 2012. Coffee and sustainability: the multiple values of traditional shaded coffee. *Journal of Sustainable agriculture* 36:353-377.
- UNFCCC. 2005. FCCC/CP/2005/MISC.1. Reducing emissions from deforestation in developing countries: approaches to stimulate action. Proposal from Governments of Papua New Guinea and Costa Rica.
- UNFCCC. 2007. FCCC/CP/2007/6/Add.1. Decision 1/CP.13. Bali Action Plan.
- UNFCCC. 2009. Decision 4/CP.15. Methodological guidance for activities relating to reducing emissions from deforestation and forest degradation and the role of conservation, sustainable management of forests and enhancement of forest carbon stocks in developing countries. Conference of the Parties.
- Valdés-Velarde, E., L. Rojas-Pérez, J. C. Vázquez-Rodríguez, V. M. Ordaz-Chaparro, J. Pérez-Nieto, J. C. Vázquez-Rodríguez, M. J. Juárez-Hernández, D. Gutiérrez del Pozo y A. Merino. 2014. Estudio del carbono en sistemas agroforestales de una región cafetalera de Veracruz. pp. 55-61. En: F. Paz Pellat y J. Wong González (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014. Texcoco, Estado de México, México.
- Valdés-Velarde, E., Vázquez-Rodríguez, V. M. Ordaz-Chaparro, J. Pérez-Nieto, J. Ayala-Arreola, J. F. Gallardo-Lancho, E. Salcedo-Pérez y L. Krishnamurthy. 2014. Carbono capturado en sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) en Chocomán (Veracruz, México). pp. 62-69. En: F. Paz Pellat y J. Wong González (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México.
- Vargas Guillén, A., C. Tapia Velázquez, J. M. Trujillo Sánchez, J. C. de la Cruz Osorio, L. A. Mendoza Velázquez, M. Delgadillo Ramírez, M. A. Hernández Vázquez, S. Fournier and S. Quechulpa Montalvo. 2012. Fortalecimiento y Expansión de Proyectos de Captura de Carbono Forestal en Comunidades Cafetaleras de la Sierra Madre de Chiapas. AMBIO-Conservación Internacional México-CONANP. Chiapas, México 55 p.
- Velázquez-Rodríguez, A. S. y F. Paz-Pellat. 2020. Fertilidad de los suelos cafetaleros bajo sombra de la Sierra Madre de Chiapas, México. pp. 469-475. En: J. M. Hernández, M. Rojo, M. Fuentes, A. Velázquez y M. Bolaños (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2020. Texcoco, Estado de México, México.
- Villanueva-López, G., P. Martínez-Zurimendi, F. Casanova-Lugo, L. Ramírez-Avilés y P. I. Montañez-Escalante. 2015. Almacenamiento de carbono en sistemas ganaderos con cercas vivas de *Gliricidia sepium* en Tacotalpa, Tabasco, México. pp. 248-255. En: F. Paz Pellat, J. Wong González y R. Torres Alamilla (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015. Texcoco, Estado de México, México.
- Williams-Guillén and S. Otterstrom. 2014. Market-based incentives for the conservation of ecosystem services in agricultural landscapes: examples from coffee cultivation in Latin America. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, Volume 4, pp.172-185.