



Reservas de carbono en sistemas agroforestales con café (*C. arabica* L.) ante el cambio climático: caso México¹

Carbon stocks in coffee (*C. arabica* L.) agroforestry systems in the face of climate change: México case

Patricia Ruiz-García², Alejandro Ismael Monterroso-Rivas³, Eduardo Valdés-Velarde⁴, Esteban Escamilla-Prado⁵, Jesús David Gómez-Díaz³

¹ Recepción: 10 de octubre, 2021. Aceptación: 7 de marzo, 2022. Este trabajo formó parte de la tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible del primer autor en la Universidad Autónoma Chapingo, financiada por el Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

² Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia, Posgrado en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible. Km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, México C.P. 56230. patyru31@gmail.com (autor para correspondencia, <https://orcid.org/0000-0003-3283-5996>).

³ Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos. Km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, México C.P. 56230. aimrivas@correo.chapingo.mx (<https://orcid.org/0000-0003-4348-8918>), dgomez@correo.chapingo.mx (<https://orcid.org/0000-0003-2034-3548>).

⁴ Universidad Autónoma Chapingo, Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sustentable. Km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, México C.P. 5623. valdevela@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-6226-7443>).

⁵ Universidad Autónoma Chapingo, Centro Regional Universitario Oriente. Km. 6 carretera Huatusco-Jalapa, Huatusco, Veracruz C.P. 94100. espreschoca@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-6602-7033>).

Resumen

Introducción. El cambio climático puede alterar las reservas de carbono (C) almacenado en los sistemas agroforestales con café. **Objetivo.** Simular las reservas de C en la biomasa aérea (ABOC) y suelo (COS) a una proyección de cincuenta años bajo la línea base y con escenarios de cambio climático en sistemas agroforestales con café, mediante el modelo CO2Fix. **Materiales y métodos.** En el año 2020, se estableció la línea base de C total (ABOC + COS) en veinticinco parcelas de café orgánico de la Sociedad Catuaf Amarillo S. de S.S, Chocamán, Veracruz, México. Las parcelas se clasificaron en tres diseños agroforestales: D1 (árboles de sombra-café en laderas), D2 (árboles de sombra-café-plátano en laderas) y D3 (árboles de sombra-café-plátano en el valle). Se utilizó el modelo CO2Fix para simular las reservas de C total a una proyección de cincuenta años bajo la línea base y con escenarios de cambio climático en los tres diseños agroforestales con café. **Resultados.** El C total en la línea base fue de 124,59, 107,43 y 102,320 t ha⁻¹, para D1, D2 y D3, respectivamente. Se presentaron disminuciones entre 0,77 y 8,75 t ha⁻¹ en las reservas de C total bajo escenarios de cambio climático en los tres diseños agroforestales evaluados. No hubo diferencias estadísticamente significativas entre los diseños agroforestales en la línea base y bajo escenarios de cambio climático. Aunque se constataron variaciones, las reservas de C total se mantuvieron a lo largo del tiempo. La cohorte de árboles fue la principal fuente de almacenaje del C total. **Conclusión.** Fue posible simular, en una proyección de cincuenta años, las reservas de carbono en la biomasa aérea y suelo en la línea base, bajo los diferentes escenarios de cambio climático, mediante el uso del modelo CO2Fix, en sistemas agroforestales con café de la Sociedad Catuaf Amarillo S. de S.S.

Palabras clave: simulación de carbono, biomasa aérea, carbono orgánico del suelo, árboles de sombra, escenarios de cambio climático.



Abstract

Introduction. Climate change can alter carbon (C) stocks stored in coffee agroforestry systems. **Objective.** To simulate C stocks in the aboveground biomass (ABOS) and soil (COS) at a fifty-years projection under the baseline and climate change scenarios in agroforestry systems with coffee, using the CO2Fix model. **Materials and methods.** In 2020, the baseline total C (ABOC + COS) was established in twenty-five organic coffee plots of the Catuai Amarillo S. de SS Society, Chcaman, Veracruz, Mexico. The plots were classified into three agroforestry designs: D1 (shade trees -coffee on slopes), D2 (shade trees -coffee-banana on slopes), and D3 (shade trees -coffee-banana in the valley). The CO2Fix model was used to simulate the total C stocks at a fifty-years projection under the baseline and climate change scenarios in the three agroforestry designs with coffee. **Results.** The total C in the baseline was 124.59, 107.43, and 102.320 t ha⁻¹ for D1, D2, and D3, respectively. There were decreases between 0,77 and 8,75 t ha⁻¹ in the low total C stocks under climate change scenarios in the three agroforestry designs evaluated. There were no statistically significant differences between agroforestry designs in the baseline and under climate change scenarios. Although variations were found, total C stocks were maintained over time. The tree cohort was the main storage source of total C storage. **Conclusion.** It was possible to simulate, in a fifty-year projection, the carbon stocks in aboveground biomass and soil in the baseline, under different climate change scenarios, using the CO2Fix model, in agroforestry systems with coffee from the Catuai Amarillo S. de S.S. Society.

Keywords: carbon simulation, aboveground biomass, soil organic carbon, shade trees, climate change scenarios.

Introducción

El aumento de la temperatura y la variación en el régimen de lluvias que deriva en un cambio en el clima global (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021), representa una amenaza para la actividad cafetalera (Rahn et al., 2018). El cambio en las variables del clima puede perjudicar la fenología de *Coffea arabica* L., al alterar la floración, afectar el crecimiento y maduración del fruto, y causar anormalidades y aborto de hojas, flores y frutos (Parada-Molina, Cervantes-Pérez et al., 2020; Ruiz-García et al., 2021). Además, se espera un incremento en la incidencia y severidad de la roya del café (*Hemileia vastatrix*), así como otras enfermedades fúngicas para el año 2050 (Parada-Molina, Cerdán et al., 2020).

El cambio climático también puede disminuir las reservas de carbono en los diferentes sistemas cafetaleros, pues se ha detectado que el aumento de la temperatura altera el comportamiento de los microorganismos que ocasiona pérdidas en las reservas de carbono en el suelo (COS) (Lozano-García et al., 2017). Mientras que la disminución de la precipitación puede generar una menor actividad microbiana y descomposición de COS (Jansson & Hofmockel, 2020).

Los sistemas cafetaleros de Veracruz, que es el segundo estado con mayor producción de café en México (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria [CEDRSSA], 2019), no están exentos de los impactos del cambio climático, ya que se estima que la producción de café puede disminuir hasta 34 % para finales del siglo XXI (Brigido et al., 2015). El 90 % de la superficie sembrada con café en Veracruz utiliza árboles nativos e introducidos de usos múltiples para sombra, en su mayoría, en áreas menores a 5 ha (Elms, 2019). El uso de cafetales bajo sombra puede mitigar los efectos del cambio climático, ya que tienen el potencial de incrementar las reservas de C durante periodos más largos (Zaro et al., 2020). Se estima que los sistemas agroforestales con café en diferentes zonas tropicales pueden almacenar entre 194,96 t ha⁻¹ y 195,60 t ha⁻¹ de C en la biomasa aérea y en el suelo (Betemariyam et al., 2020; Zaro et al., 2020).

Los sistemas agroforestales con café en el sur de México pueden almacenar entre 150 t ha⁻¹ y 194,7 t ha⁻¹ de carbono (Álvarez Arteaga et al., 2012; Soto-Pinto & Aguirre-Dávila, 2015), mientras que en el estado de Veracruz pueden almacenar hasta 188 t ha⁻¹ (Masuhara et al., 2015). Por lo tanto, los sistemas agroforestales con café juegan un papel importante en el almacenamiento de C, al tiempo que promueve la conservación de árboles útiles en el paisaje agrícola (Solis et al., 2020).

La cantidad de C almacenada en los suelos de los sistemas agroforestales depende de sus características, las entradas y salidas de carbono orgánico de origen vegetal y animal, el manejo del sistema, la estructura, diversidad y densidad de árboles, la edad de los mismos, su diámetro y altura en cada estrato, que están determinados por factores sociales, económicos y condiciones climáticas (Madountsap Tagnang et al., 2019; Salgado-Mora et al., 2018). Las condiciones climáticas pueden alterar las reservas de C a largo plazo (Jansson & Hofmockel, 2020). En un estudio del mediterráneo se detectó que bajo escenarios de cambio climático las reservas de COS disminuyan en la capa superior del suelo (Lozano-García et al., 2017). Se necesitan conocer los efectos del cambio climático en las reservas de C de sistemas agroforestales con café, para dar posibles soluciones que ayuden a mantener la viabilidad del sistema en el futuro (Ruiz-García et al., 2021).

En México se ha generado información sobre proyecciones de las reservas de C en reforestaciones de bosques templados del norte del país (Návar Cháidez et al., 2005), así como en plantaciones forestales del estado de Oaxaca (Álvarez & Rubio, 2016). Sin embargo, existe escasa información sobre proyecciones de las reservas de C y su comportamiento bajo escenarios de cambio climático en sistemas cafetaleros (Ruiz-García et al., 2020).

Se han utilizado diversos modelos para simular las reservas de C en diferentes sistemas y agroecosistemas, tales como CBM-CFS3, CASMOFOR, EFISCEN, CENTURY, CO2FIX (Kim et al., 2015). El modelo CBM-CFS3 analiza la dinámica de C con perturbaciones y cambios en el uso de la tierra, CASMAFOR se enfoca a plantaciones forestales, al igual que EFISEN y CENTURY, que también incluyen diversos escenarios a nivel de paisaje (Kim et al., 2015). Mientras que el modelo CO2Fix tiene la capacidad de simular las reservas y flujos de C en la biomasa aérea y materia orgánica del suelo en plantaciones forestales y agroforestales con diversidad de especies en múltiples cohortes (Schelhass et al., 2004).

El modelo calcula el balance de C con un intervalo de tiempo de un año. El insumo básico es el crecimiento del volumen del tallo y el patrón de asignación a los otros compartimentos del árbol (follaje, ramas y raíces), así como parámetros generales tales como: número de podas anuales, la edad del arbolado, la rotación de los cultivos, la densidad arborea y arbustiva, la temperatura y precipitación anual y mensual, y la evapotranspiración de referencia (ET₀) del periodo de crecimiento (Maser et al., 2003).

El modelo CO2Fix puede contribuir a obtener información sobre la proyección de las reservas de C tanto en el escenario base como en escenarios de cambio climático en los sistemas agroforestales del estado de Veracruz. El conocimiento sobre las existencias de C bajo escenarios de cambio climático, puede ayudar a mejorar las estrategias de mitigación que se generan en estos sistemas, mediante la utilización de especies arbóreas y arbustivas que tengan mayor potencial de fijación de C, así como en el mejoramiento de prácticas agrícolas (incorporación de materia orgánica al suelo, manejo integrado de nutrientes, aplicación de lombricompostas y estiércoles enriquecidos) (Negash & Kanninen, 2015). Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue simular las reservas de C en la biomasa aérea (ABOC) y suelo (COS) a una proyección de cincuenta años bajo la línea base y con escenarios de cambio climático en sistemas agroforestales con café, mediante el uso del modelo CO2Fix.

Materiales y métodos

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en el periodo comprendido del 5 de marzo del 2020 al 30 de mayo del 2021 en la Sociedad de Solidaridad Social Catuaf Amarillo S. de S.S, que pertenece a pequeños productores de café (*C. arabica* L.) orgánico bajo sistemas agroforestales. Se evaluaron las veinticinco fincas cafetaleras de la Sociedad, las cuales se localizan en el municipio de Chocamán, Veracruz, México, que se ubica entre los paralelos 18° 58' y 19° 02' de latitud norte y los meridianos 97° 00' y 97° 06' de longitud oeste; tiene una altitud entre 1100 y 2200 m s.n.m. (Figura 1). Cada finca tiene un área entre 1 a 5 ha, que en conjunto suman un total de 50 ha. La edad promedio de los sistemas agroforestales con café es de treinta años. El 80 % de la superficie de los sistemas cafetaleros evaluados se ubica en las laderas (entre 15 y 60 % de pendiente), mientras que el 20 % se ubica en el valle (con pendiente de 0 a 5 %) (Ruiz-García et al., 2020).

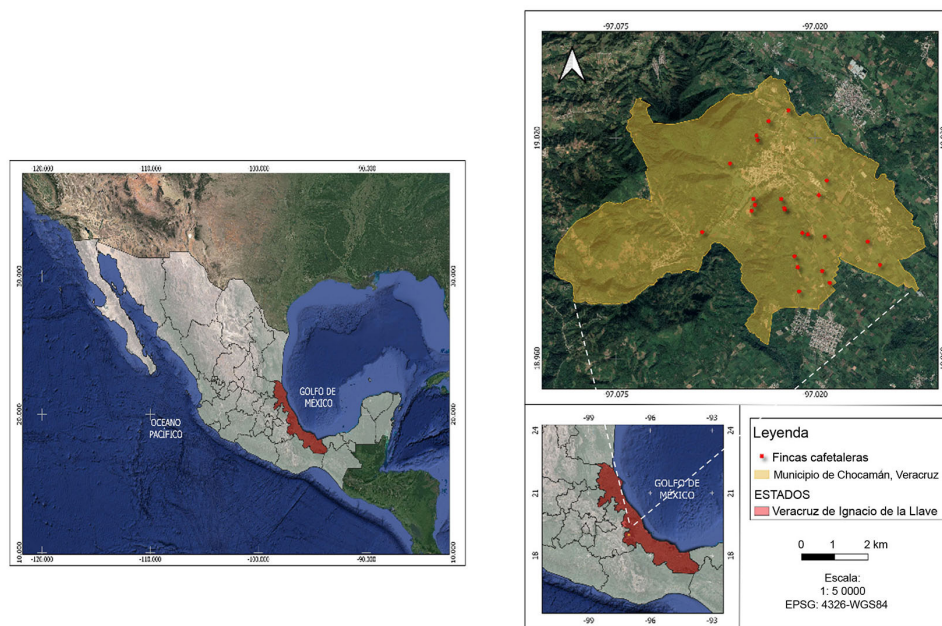


Figura 1. Ubicación de las fincas cafetaleras evaluadas en la Sociedad de Solidaridad Social Catuaf Amarillo S. de SS. Localizadas en el municipio de Chocamán, Veracruz, México entre los paralelos 18° 58' y 19° 02' de latitud norte y los meridianos 97° 00' y 97° 06' de longitud oeste. 2020.

Figure 1. Location of the coffee farms evaluated in the Sociedad de Solidaridad Social Catuaf Amarillo S. de SS. Located in the municipality of Chocamán, Veracruz, Mexico between parallels 18° 58' and 19° 02' north latitude and meridians 97° 00' and 97° 06' west longitude. 2020.

El tipo de suelo dominante en las fincas evaluadas es Luvisol (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática [INEGI], 2013). Los luvisols se caracterizan por tener un menor contenido de arcillas en la capa superior y un mayor contenido en el suelo subsuperficial (horizonte árgico), donde existe mayor actividad de arcillas y alta saturación de bases (Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura &

Unión Internacional de las Ciencias del Suelo, 2015). El clima representativo donde se ubican las fincas cafetaleras evaluadas es semicálido húmedo del grupo de los templados con verano fresco largo y lluvias todo el año (A) Cb(fm)(i')gw" (García, 2004). La temperatura media anual es de 18,8 °C, con una mínima de 14,5 °C y una máxima de 22,8 °C; el rango anual de precipitación oscila entre 1800 y 2000 mm (Comisión Nacional del Agua-Servicio Meteorológico Nacional [CNA-SMN], s.f.).

En un estudio previo que se llevó a cabo en las fincas cafetaleras evaluadas se registraron alrededor de 51 especies arbóreas y arbustivas de usos múltiples implementadas como sombra de los cafetales (Ruiz-García et al., 2020). Las especies con mayor valor de importancia ambiental (VI) que reporta el estudio son *Acrocarpus fraxinifolius* Wight et Arn, *Inga vera* Willd, *Inga spuria* H & B. Ex Willd, *Lippia myriocephala* Schltdl. & Cham y *Musa acuminata* Colla (Ruiz-García et al., 2020).

Dadas las características de composición estructural arbórea y arbustiva que determinaron Ruiz-García et al. (2020), las fincas cafetaleras se clasificaron en tres diseños agroforestales, a partir de esta clasificación es como se reportaron los resultados de esta investigación (Cuadro 1). El primer diseño (D1) se caracterizó por presentar las cohortes de árboles de sombra y café; se localizó en las laderas (entre 15 y 60 % de pendiente) del área de estudio. El segundo diseño (D2), además de tener las dos cohortes anteriores, presentó la cohorte de plátano a una densidad de 1260 plantas/ha. Este diseño también se localizó en las laderas de la zona evaluada. El tercer diseño (D3), al igual que D2, estuvo constituido por las cohortes de árboles de sombra-café-plátano. En este caso, el diseño se ubicó en el valle (pendiente de 0 a 5 %) de la zona (Cuadro 1). Las cohortes se definen como un grupo de individuos o especies dentro del sistema, que tienen un crecimiento similar (Alder & Silva, 2000). La renovación de la cohorte de café se hace cada veinte años, mientras que la de plátano cada diez años.

Cuadro 1. Característica de los diseños agroforestales y las principales cohortes en las fincas cafetaleras de la Sociedad Catuái Amarillo S de S.S., Chocamán, Veracruz, México. 2020.

Table 1. Characteristics of the agroforestry designs and the main cohorts identified in the coffee farms of the Sociedad Catuái Amarillo S de S.S., Chocaman, Veracruz, Mexico. 2020.

Diseño agroforestal	Descripción	Pendiente* (%)	Cohortes					
			Especie con mayor valor de importancia ambiental (VI)*			Densidad (plantas ha ⁻¹)		
			Árboles de sombra	Café	Plátano	Árboles de sombra	Café	Plátano
D1	Árboles de sombra-café en laderas	15-60	<i>I. vera</i> , <i>I. spuria</i> y <i>L. myriocephala</i>			-----	374	2600
D2	Árboles de sombra-café-plátano en laderas		<i>L. myriocephala</i> <i>Trema micrantha</i> (L.) Blume y <i>A. fraxinifolius</i>	<i>C. arabica</i>	<i>M. acuminata</i>	200	2800	1260
D3	Árboles de sombra-café-plátano en el valle	0-5	<i>I. vera</i> y <i>A. fraxinifolius</i>			274	3100	1670

*Obtenido de Ruiz-García et al. (2020). / Obtained from Ruiz-García et al. (2020).

Determinación de la línea base de carbono en la biomasa aérea y del suelo

La determinación de la línea base de C en la biomasa aérea y del suelo se describe en los subsiguientes apartados.

Biomasa aérea

El C inicial de la biomasa aérea se determinó mediante un inventario de los reservorios de C en todas las fincas cafetaleras de la Sociedad Catuaí Amarillo S de S.S (veinticinco fincas). En cada finca se estableció una parcela de muestreo circular de 1000 m², donde se registró el nombre común y la especie de cada individuo que conformó el estrato arbóreo y arbustivo. Para cada individuo del estrato arbóreo, se midió el diámetro normal a la altura de 1,30 m, mediante el uso de una cinta diamétrica, y la altura total con un hipsómetro Haga. En el caso los individuos del estrato arbustivo, se midió el diámetro a 15 cm al ras del suelo con un vernier manual y la altura con una vara graduada.

Se estimó la biomasa máxima total (t ha⁻¹), así como el contenido de C orgánico de follaje, raíces, ramas y tallos (t ha⁻¹), mediante ecuaciones alométricas registradas en literatura (Cuadro 2 y 3).

Cuadro 2. Ecuaciones alométricas usadas para determinar el contenido de C orgánico total (t ha⁻¹) en la línea base de la biomasa aérea en sistemas agroforestales de la Sociedad Catuaí Amarillo S de S.S., Chocamán, Veracruz, México. 2020.

Table 2. Allometric equations used to determine the total organic C content (t ha⁻¹) in the baseline of aboveground in agroforestry systems of the Sociedad Catuaí Amarillo S de S.S., Chocaman, Veracruz, Mexico. 2020.

Especie	Ecuación alométrica	R ²	Fuente
<i>Musa acuminata</i> Colla	$Y=0,356*(EXP(0,036*Gbase))$	0,83	(Nyombi et al., 2009)
<i>Coffea arabica</i> L	$Y=0,147*(d^2)$	0,80	(Negash et al., 2013)
<i>Inga vera</i> Willd	$\text{Log10Y} = -0,889+2,317 * \text{Log10dbh (cm)}$	0,96	(Segura et al., 2006)
<i>Cordia alliodora</i> (Ruíz & Pav.) Oken	$\text{Log10Y} = -0,755+2,072 * \text{Log10dbh (cm)}$	0,95	(Segura et al., 2006)
<i>Juglans olanchana</i> Standl & L. O. Williams	$\text{Log10Y} = -1,417+2,755 * \text{Log10dbh (cm)}$	0,97	(Segura et al., 2006)
Especies arbóreas con crecimiento similar	$\text{Log10Y} = -0,834+2,223 * \text{Log10dbh (cm)}$	0,93	(Segura et al., 2006)

Suelo

Dentro de la parcela de muestreo de 1000 m², se obtuvieron muestras de suelo con una barrena de muestras inalteradas a una profundidad de 0-30 cm. Se obtuvo el porcentaje de C orgánico mediante combustión seca con un analizador de C total (TOC-Shimadsu). El COS en t ha⁻¹, se determinó con el cálculo de la densidad aparente del suelo, según la ecuación (1) y el porcentaje de C orgánico.

$$DAP = \frac{Pss}{VTs} \dots\dots\dots (1)$$

Donde DAP = densidad aparente del suelo (g⁻¹ cm³), Pss = peso del suelo seco (g) y VTs = volumen total del suelo.

Simulación de las existencias de C en la biomasa aérea y suelo bajo el escenario base

La simulación de las existencias de C en la biomasa y suelo bajo el escenario base se describe a continuación.

Biomasa aérea

La proyección de las reservas de C a cincuenta años bajo el escenario base se realizó con el modelo CO2Fix v3.1 (Masera et al., 2003; Schelhaas et al., 2004), que tiene como base el uso de cohortes que se manejan como

Cuadro 3. Principales parámetros de entrada para modelar la biomasa aérea con CO2Fix en las cohortes de los diseños agroforestales de la Sociedad Catuái Amarillo S de S.S., Chocamán, Veracruz, México. 2020.

Table 3. Main input parameters to model aboveground using CO2Fix in the cohorts of agroforestry designs classified in the Sociedad Catuái Amarillo S de S.S., Chocaman, Veracruz, México. 2020.

Parámetro	Cohorte		
	Árboles de sombra	Café	Plátano
Contenido de C (%)	0,48 (Kuyah et al., 2012)	0,49 (Negash et al., 2013)	0,47 (Negash et al., 2013)
Densidad madera (MgDM/m ³)	0,60 (Ordoñez Díaz et al., 2015)	0,62 (Negash & Kanninen, 2015)	0,20 (Negash & Kanninen, 2015)
Crecimiento relativo del follaje	Log10Y = -1,464 + 2,003 * Log10dbh (cm) (Segura et al., 2006)	Y=0,007*(d ²) (Negash et al., 2013)	Y=7,71*(10 ⁻⁵)*(Gbase) ^{2,28} (Nyombi et al., 2009)
Crecimiento relativo de ramas	Log10Y = -1,287 + 2,275 * Log10dbh (cm) (Segura et al., 2006)	Y=0,058*(d ²) (Negash et al., 2013)	-----
Crecimiento relativo de raíces	Basado en el 17 % de la biomasa total (Negash & Kanninen, 2015)		Y=4,44*(10 ⁻⁵)*(Gbase) ^{2,08} (Nyombi et al., 2009)
Mortalidad (%) (Observaciones en campo)	20	10	10
Raleo (Observaciones en campo)	30 % de raleo de ramas cada 15 años	Cosecha de todo el rodal cada 20 años	Cosecha de todo el rodal cada 10 años

Para todas las cohortes: tasa de rotación del follaje: tallo y follaje, 0,5; ramas, 0,05 y raíces, 0,05 (Negash & Kanninen, 2015). C inicial (t ha⁻¹) y biomasa aérea máxima (t ha⁻¹): inventario de biomasa aérea de C. Crecimiento del tallo (ICA m³ ha⁻¹): en función de la biomasa aérea máxima (t ha⁻¹). / For all cohorts: Foliage turnover rate: stem and foliage, 0,5; branches, 0,05 and roots, 0,05 (Negash & Kanninen, 2015). Initial C (t ha⁻¹) and maximum aboveground biomass (t ha⁻¹): Inventory of aboveground biomass of C. Stem growth (ICA m³ ha⁻¹): As a function of maximum aboveground biomass (t ha⁻¹).

entidades individuales dentro del modelo (Masera et al., 2003). Los parámetros de entrada se obtuvieron del inventario de los reservorios de ABOC y de revisión de literatura (Cuadro 3), para correr el modelo en las cohortes de los diseños agroforestales que se clasificaron a partir de las características de composición estructural arbórea y arbustiva que reportaron Ruiz-García et al. (2020) en la Sociedad Catuái Amarillo.

Las reservas de C en la biomasa aérea de todo el sistema (Cbt), se puede expresar como la suma de la biomasa de cada cohorte de acuerdo con la ecuación (2) (Masera et al., 2003; Schelhaas et al., 2004).

$$C_{bt} = \sum C_{bit} \dots\dots\dots(2)$$

Donde Cbit es el C almacenado en la biomasa viva de la cohorte “i” en el momento “t” (t ha⁻¹).

Las existencias de Cbit a lo largo del tiempo se determinó mediante la ecuación 3 (Schelhaas et al., 2004):

$$C_{bit+1} = \sum C_{bit} + Kc [G_{bit} - M_{sit} - T_{it} - H_{it}] \quad (\text{Mg C ha}^{-1}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

Donde Kc = constante para convertir biomasa en contenido de C (t C por t de peso seco de biomasa), Gbit = crecimiento de biomasa, Tit = rotación de ramas, follaje y raíces, Msit = mortalidad de los árboles por senescencia, Hit = cosecha.

Suelo

Las reservas de COS en el escenario base se proyectaron a cincuenta años con CO2Fix que maneja el modelo dinámico de carbono del suelo YASSO (Schelhaas et al., 2004). El modelo describe la descomposición y la dinámica de C en suelos bien drenados (Schelhaas et al., 2004). Consta de tres compartimentos que describen la descomposición física de la materia orgánica (tallos, ramas + raíces gruesas y follaje + hojarasca) y cinco compartimentos que describen la descomposición microbiana y procesos de humificación en el suelo (compuestos solubles, holocelulosas, lignina y dos tipos diferentes de humus) (Masera et al., 2003). Para aplicar el modelo se determinaron las reservas de C ($\text{t ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) del follaje, raíces, ramas y tallos, en las cohortes de cada diseño agroforestal, bajo el supuesto de que contribuyen al año con el 5 % de sus reservas de C al suelo (Negash & Kanninen, 2015). Se tomó el valor por default que arrojó el modelo sobre la descomposición microbiana y humificación del suelo.

Los parámetros generales que se utilizaron fueron la suma de las temperaturas medias mensuales por encima de 0°C , precipitación (mm) y evapotranspiración de referencia (ET_0 mm) del periodo de crecimiento (Schelhaas et al., 2004). Los datos de temperatura y precipitación se obtuvieron de observaciones diarias durante un periodo de treinta años (periodo comprendido entre los años 1978-2008), determinadas en la estación meteorológica Coscomatepec por la Comisión Nacional del Agua - Servicio Meteorológico Nacional (CNA-SMN, s.f.). La evapotranspiración de referencia del periodo de crecimiento se calculó con la ecuación (4) de FAO Penman-Monteith (Allen et al., 2006).

$$\lambda\text{ET} = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \dots\dots\dots(4)$$

Donde R_n es la radiación neta; G es el flujo del calor en el suelo, $(e_s - e_a)$, representa el déficit de presión de vapor del aire; ρ_a es la densidad media del aire a presión constante; c_p es el calor específico del aire, representa la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación; Δ es la constante psicrométrica; y r_s y r_a son la resistencia superficial (total) y aerodinámica.

Simulación del C en la biomasa aérea y suelo bajo escenarios de cambio climático

Los parámetros generales que se cambiaron dentro del modelo CO2Fix para hacer la simulación del C en la biomasa aérea y suelo bajo escenarios de cambio climático fueron: temperatura ($^\circ\text{C}$), precipitación (mm) y ET_0 (mm) del periodo de crecimiento. Se utilizaron los datos de temperatura media mensual ($^\circ\text{C}$) y precipitación (mm) de cuatro modelos generales de circulación atmosférica que fueron generados por el Coupled Model Intercomparison Project Phase, propuestos en el reporte de la Quinta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, disponible en la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS, 2020).

Los modelos que se utilizaron en cada escenario fueron: Escenario 1. MPI_ESM-LR (Max-Planck-Institut für Meteorologie); Escenario 2. HADGEM2-ES (Hadley Centre Global Environment Model); Escenario 3. GFDL_CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory); y Escenario 4. CNRM_CM5 (Centre National de Recherches Météorologiques). Cada modelo tuvo una resolución $30'' \times 30''$ y forzamiento radiativo (RCP) de $8,5 \text{ W m}^{-2}$ (emisiones altas), en horizontes de tiempo de futuro cercano (2015-2039), futuro medio (2045-2069) y futuro lejano (2075-2099).

La ET_0 bajo escenarios de cambio climático se calculó con la sustitución de los datos de temperatura media mensual ($^{\circ}C$) y precipitación (mm), que se obtuvieron de los modelos generales de circulación atmosférica. No se realizaron cambios en los parámetros de entrada para modelar la biomasa aérea ni en las reservas de carbono en el suelo (t/ha/año) de follaje, raíces, ramas y tallos en las cohortes de cada diseño agroforestal.

Después de obtener los parámetros de precipitación, temperatura y ET_0 del periodo de crecimiento bajo escenarios de cambio climático para cada horizonte de tiempo, se determinó el incremento o disminución de estos parámetros con respecto al escenario base.

Análisis de datos

La variación de las reservas de C se determinó mediante el cálculo de la desviación media estándar, tanto en la línea base, como en la simulación en un periodo de cincuenta años en cada diseño agroforestal. Para probar las diferencias entre las existencias de carbono en los diferentes diseños agroforestales y escenarios bajo la condición actual y con cambio climático, se realizó un ANOVA no paramétrico de dos vías (prueba de Kruskal-Wallis) (Negash & Kanninen, 2015). Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software InfoStat/L v.2020.

Resultados

Todos los resultados obtenidos en esta investigación, tanto en la línea base como en los diferentes escenarios de cambio climático, estuvieron en función de la composición y selección de las especies, la densidad, la edad de rotación y la intensidad del manejo en cada diseño agroforestal evaluado, que fueron parámetros de entrada para correr el modelo CO2Fix y que se describe en el apartado de materiales y métodos.

Línea base de C en la biomasa aérea y del suelo

A continuación se describen los resultados del contenido de ABOC y SOC en la línea base.

Biomasa aérea

La cohorte de árboles de sombra fijó el 85 % de la biomasa aérea (ABOC) total en D1 (densidad= 374 plantas/ha), 79 % en D2 (densidad= 200 plantas/ha) y 68 % en D3 (densidad= 274 plantas/ha). La cohorte de café proporcionó el 15 % (densidad= 2600 plantas/ha), 17 % (densidad= 2800 plantas/ha) y 28 % (densidad= 3100 plantas/ha) del ABOC total en D1, D2 y D3, respectivamente. La cohorte de plátano tan sólo fijó el 3,9 % en D2 (densidad= 1260 plantas/ha) y 3,7 % en D3 (densidad= 1670 plantas/ha). El primer diseño agroforestal (D1) presentó el mayor contenido de C orgánico total inicial en la biomasa aérea (32,38 t ha⁻¹). Mientras que D2 obtuvo el menor contenido (25,21 t ha⁻¹) (Cuadro 4, P<0,05).

Suelo

La media del contenido inicial de COS en la línea base en D1 fue de 80,21 t ha⁻¹ con una DAP de 0,94 g⁻¹ cm³. En D2 el C fue de 65,22 t ha⁻¹ y en D3 fue de 71,13 t ha⁻¹ con una DAP de 0,99 y 1,00 g⁻¹ cm³, respectivamente.

Cuadro 4. Medias de la Biomasa máxima $\pm$ SD (t ha^{-1}) y C orgánico total en la biomasa aérea $\pm$ SD (t ha^{-1}), así como de follaje, raíces, ramas y tallos en las principales cohortes identificadas en los diseños agroforestales de café (*C. arabica* L.) de la Sociedad Catuai Amarillo S. de S.S., Chocamán, Veracruz, México. 2021.

Table 4. Means of the maximum biomass $\pm$ SD (t ha^{-1}) and total C aboveground $\pm$ SD (t ha^{-1}), as well as foliage, roots, branches, and stems in the main cohorts identified in the agroforestry designs of coffee (*C. arabica* L.) from the Sociedad Catuai Amarillo S. de S.S. Chocaman, Veracruz, Mexico. 2021.

Diseño agroforestal	Cohorte	Biomasa máxima total (t ha^{-1})	Tallo	Follaje	Ramas	Raíz	Total
			t ha^{-1}				
D1*		67,27 + 38,03^a					32,38 + 18,22^a
	Árboles de sombra	57,15 + 41,07	14,13 + 10,11	2,37 + 1,92	8,07 + 5,72	4,23 + 3,11	27,43 + 19,71
	Café	10,11 + 6,10	2,59 + 1,56	0,22 + 0,13	1,82 + 1,09	0,78 + 0,47	4,95 + 2,98
D2**		52,38 + 23,73^a					25,21 + 11,46^a
	Árboles de sombra	41,33 + 22,45	11,70 + 7,99	1,84 + 1,04	6,50 + 3,50	3,15 + 1,74	19,83 + 10,77
	Café	8,95 + 15,38	2,29 + 3,95	0,19 + 0,34	1,61 + 2,76	0,69 + 1,18	4,38 + 7,54
	Plátano	2,10 + 1,95	0,51 + 0,47	0,21 + 0,21	----	0,05 + 0,05	0,99 + 0,91
D3***		54,26 + 18,62^a					26,17 + 8,99^a
	Árboles de sombra	37,14 + 11,92	10,30 + 3,79	1,58 + 0,70	5,77 + 2,58	2,77 + 0,88	17,82 + 5,72
	Café	15,02 + 8,51	3,85 + 2,18	0,33 + 0,18	2,70 + 1,53	1,16 + 0,65	7,36 + 4,17
	Plátano	2,09 + 1,68	0,49 + 0,39	0,19 + 0,15	----	0,05 + 0,04	0,98 + 0,79

*Árboles de sombra-café en laderas; ** Árboles de sombra-café-plátano en laderas; ***Árboles de sombra-café-plátano en el valle. Medias seguidas de letras iguales indican diferencias no significativas entre diseños agroforestales ($P < 0,05$).

* Shade trees -coffee on slopes; ** shade trees-coffee-banana on slopes; *** shade trees-coffee-banana in the valley. Means followed by the same letters indicate non-significant differences between agroforestry designs ($P < 0,05$).

El C orgánico total, que considera tanto al ABOC como al COS, fue de $124,59 \text{ t ha}^{-1}$, $107,43 \text{ t ha}^{-1}$ y $102,320 \text{ t ha}^{-1}$, para D1, D2 y D3, respectivamente. El COS aportó entre el 74 % y 76 % del C total de los diseños evaluados. Por lo que representa el mayor reservorio de C en los diseños agroforestales de café evaluados. No existieron diferencias significativas en el COS y C total entre los tres diseños agroforestales evaluados ($P > 0,05$).

Simulación de las existencias de C en la biomasa aérea y suelo bajo el escenario base

A continuación se describen los resultados que se obtuvieron de la simulación de C mediante el uso del modelo CO2Fix en la ABOC y SOC bajo el escenario base.

Biomasa aérea

Los resultados que arrojó el modelo CO2Fix sobre la biomasa aérea (ABOC) total bajo el escenario base a una proyección de cincuenta años mostraron que D2 tendrá un mayor contenido de C ($67,35 \text{ t ha}^{-1}$) en comparación con D1 ($60,61 \text{ t ha}^{-1}$) y D3 ($51,47 \text{ t ha}^{-1}$) (Figura 2). El secuestro neto de C fue similar en D1 y D3 ($0,62$ y $0,61 \text{ t/ha/}$

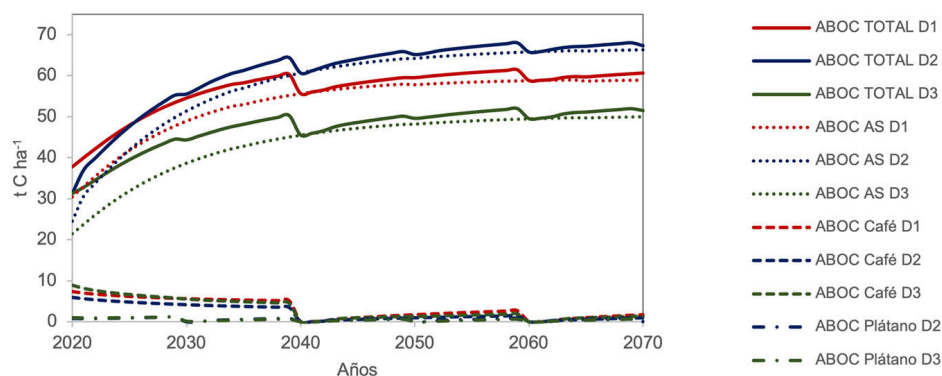


Figura 2. Evolución en un periodo de cincuenta años de las existencias de C en la biomasa aérea (ABOC) simuladas con el modelo CO2Fix en el escenario base de los tres diseños agroforestales de la Sociedad Catuái Amarillo S. de S.S, Chocamán, Veracruz, México. 2021.

D1: árboles de sombra-café en laderas; D2: árboles de sombra-café-plátano en laderas; D3: árboles de sombra-café-plátano en el valle; AS: Árboles de sombra.

Figure 2. Evolution over a period of fifty years of C stocks in aerial biomass (ABOC) simulated with the CO2Fix model in the base scenario of the three agroforestry designs of the Sociedad Catuái Amarillo S. de S.S, Chocaman, Veracruz, México. 2021.

D1: shade trees -coffee on slopes; D2: shade trees-coffee-banana on slopes; D3: shade trees-coffee-banana in the valley; AS= Shade trees.

año, respectivamente) y fue moderadamente más alto en D2 (0,89 t/ha/año). De acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis, existen diferencias no significativas en la ABOC entre los tres diseños agroforestales evaluados ($P>0,05$).

La cohorte de árboles usados para sombra aportó el 97,22 % del total de ABOC en D1, 98,53 % en D2 y 97,19 % en D3. La cohorte de café contribuyó con el 2,70 % en D1 y D3 y 1,40 % en D2. La cohorte de plátano en este caso solo ingresó el 0,05 % del total de ABOC en D2 y D3. La disminución del carbono total en la biomasa aérea en D1 cada veinte años, se debe a que la cohorte de café se renueva en ese periodo. Lo mismo sucede en D2 y D3, en donde también se suma la renovación de la cohorte de plátano cada diez años.

Suelo

Las existencias medias de COS simuladas con el modelo CO2Fix a los 50 años fueron mayores en D1 (90,14 t ha⁻¹) con respecto a D2 y D3 (87,66 y 77,97 t ha⁻¹, respectivamente) (Figura 3). El secuestro neto de COS fue de 0,64, 0,61 y 0,53 t/ha/año en D1, D2 y D3, respectivamente. No se encontraron diferencias significativas de COS entre los tres diseños agroforestales evaluados ($P=0,05$).

La cohorte de árboles de sombra fue quien contribuyó con el mayor contenido de carbono en el suelo en los tres diseños evaluados (89,92 %, 87,35 % y 84,78 % en D1, D2 y D3, respectivamente).

Las existencias de C total simuladas en el periodo de cincuenta años mediante el modelo CO2Fix fueron de 150,75 t ha⁻¹ en D1, 155,01 t ha⁻¹ para D2 y 129,44 t ha⁻¹ en D3. No se encontraron diferencias significativas de C total entre los tres diseños agroforestales evaluados ($P>0,05$). La biomasa aérea total contribuyó con el 40,20 % en D1, 43,45 % en D2 y 39,46 % en D3. El COS almacenó 49,79 %, 56,54 % y 60,23 % en D1, D2 y D3, respectivamente.

Simulación del C en la biomasa aérea y suelo bajo escenarios de cambio climático

Los cambios que se realizaron en los parámetros generales para simular las existencias de C bajo escenarios de cambio climático en cada horizonte de tiempo se muestran en el Cuadro 5. En todos los escenarios y horizontes de

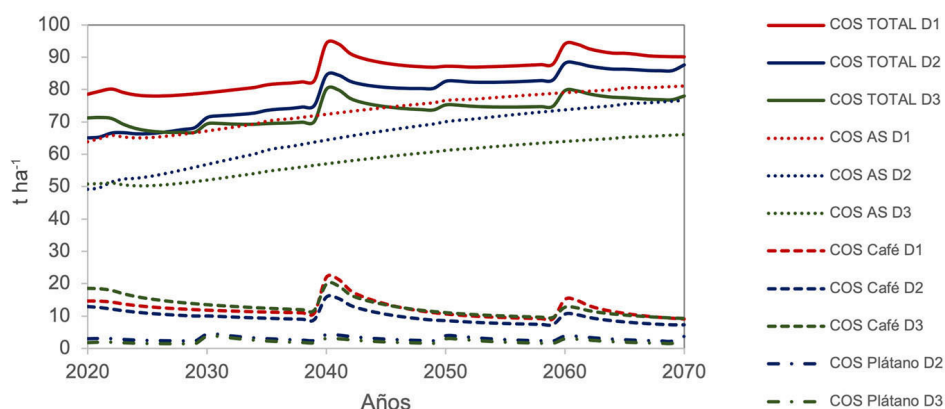


Figura 3. Evolución en un periodo de cincuenta años de las existencias de carbono orgánico del suelo (COS) simuladas con el modelo CO2Fix en el escenario base en los tres diseños agroforestales de la Sociedad Catuái Amarillo S. de S.S, Chocamán, Veracruz, México. 2021.

D1: árboles de sombra-café en laderas; D2: árboles de sombra-café-plátano en laderas; D3: árboles de sombra-café-plátano en el valle; AS= Árboles de sombra.

Figure 3. Evolution in a fifty-year period of the soil organic carbon (SOC) stocks simulated simulated with the CO2Fix model in the base scenario of the three agroforestry designs of the Sociedad Catuái Amarillo S. de S.S, Chocaman, Veracruz, México. 2021.

D1: shade trees -coffee on slopes; D2: : shade trees -coffee-banana on slopes; D3: shade trees -coffee-banana in the valley; AS: Shade trees.

Cuadro 5. Cambios realizados en los parámetros generales de temperatura (°C), precipitación (mm) y ET_0 del periodo de crecimiento del escenario base para simular las existencias de C bajo escenarios de cambio climático en cada horizonte de tiempo de la Sociedad Catuái Amarillo S. de S.S, Chocamán, Veracruz, México. 2021.

Table 5. Changes made in the general parameters of temperature (°C), precipitation (mm), and ET_0 of the growth period of the baseline scenario to simulate the C stocks under climate change scenarios in each time horizon of the Sociedad Catuái Amarillo S. de S.S, Chocaman, Veracruz, Mexico. 2021.

Horizontes de tiempo	Parámetros generales	Escenarios				
		BASE	1*	2**	3***	4****
	T media (°C)	18,35				
Cercano*			▲ 1,38	▲ 1,55	▲ 1,82	▲ 0,96
Mediano**			▲ 2,89	▲ 3,22	▲ 3,55	▲ 2,22
Lejano***			▲ 4,84	▲ 5,50	▲ 5,31	▲ 3,67
	Precipitación (mm)	2140				
Cercano			▼ 150	▼ 123	▼ 162	▼ 94
Mediano			▼ 181	▼ 155	▼ 214	▼ 211
Lejano			▼ 195	▼ 189	▼ 387	▼ 238
	ET_0 (mm)	1189				
Cercano			▲ 28,53	▲ 34,50	▲ 44,00	▲ 14,51
Mediano			▲ 73,87	▲ 86,22	▲ 103,62	▲ 56,70
Lejano			▲ 142,73	▲ 164,20	▲ 161,19	▲ 104,64

▲ Incremento en el parámetro base; ▼ Disminución en el parámetro base. * Futuro cercano, rango de años 2015-2039; ** futuro medio, rango de años 2045-2069; futuro lejano, rango de años 2075-2099. *Modelo MPI_ESM-LR; ** modelo HADGEM 2-ES; *** modelo GFDL_CM3; **** modelo CNRM_CM5. / ▲ Increase in the base parameter; ▼ Decrease in base parameter. * Near future, range of years 2015-2039; ** mid-future, year range 2045-2069; far future, years range 2075-2099. * Model MPI_ESM-LR; ** HADGEM 2-ES model; *** model GFDL_CM3; **** model CNRM_CM5.

tiempo se observó un aumento de la temperatura media con un incremento de hasta 5,5 °C en el escenario 2 (modelo HADGEM 2-ES) bajo el horizonte lejano (2075-2099 años). Se estima que la precipitación tendrá una disminución en todos los escenarios y horizontes de tiempo de hasta 387 mm en el escenario 3 (modelo GFDL_CM3) en el horizonte lejano. La ET_0 incrementará en todos los escenarios y horizontes de tiempo, con un aumento de hasta 164,20 mm en los meses del periodo de crecimiento en el horizonte lejano del escenario 2 (Cuadro 5).

No hubo diferencias significativas ($P>0,05$) en el contenido total de C en la línea base con respecto a los diferentes escenarios de cambio climático evaluados. A pesar de ello, se observaron variaciones en las reservas de C en los tres diseños bajo escenarios de cambio climático. Las existencias de carbono en D1 presentaron de manera general una disminución en la biomasa aérea, suelo y C total simuladas mediante el modelo CO2Fix en un periodo de cincuenta años bajo los diferentes escenarios y en los tres horizontes de tiempo (Cuadro 6, $P<0,05$). En el horizonte cercano la disminución del C total con respecto al escenario base fue de 8,75 t ha⁻¹ en el escenario 4 (modelo CNRM); en los demás escenarios, el C total fue similar al escenario base. En el horizonte medio el C total decreció 1,30, 1,26 y 7,93 t ha⁻¹ en el escenario 1 (modelo MPI), escenario 2 y escenario 4, respectivamente. Mientras que en el horizonte lejano la disminución en los mismos escenarios fue de 1,75, a 2,28 t ha⁻¹, respectivamente. Pero el C incrementó en 1,61 t ha⁻¹ en el escenario 3 (Cuadro 6).

Cuadro 6. Medias de las existencias de carbono en la biomasa aérea, suelo y C total $\pm$ SD (t ha⁻¹) simuladas con el modelo CO2Fix en un periodo de cincuenta años en D1= árboles de sombra-café en el valle evaluado en la Sociedad Catuaf Amarillo S. de S.S, Chocamán, Veracruz, México, bajo los diferentes escenarios en los tres horizontes de tiempo (futuro cercano, medio y lejano). 2021.

Table 6. Means of carbon stocks in aerial biomass, soil and total C + SD (t ha⁻¹) simulated with the CO2Fix model over a period of fifty years in D1= shade trees-coffee on slopes in the Sociedad Catuaf Amarillo S. de SS, Chocaman, Veracruz, Mexico under the different scenarios in the three-time horizons (near, medium, and distant future). 2021.

Horizontes de tiempo	Reservorio	Base	Carbono total (t ha ⁻¹)			
			Escenarios			
			1*	2**	3***	4****
D1 (árboles de sombra-café en el valle)						
Cercano (2015-2039)	Biomasa aérea	60,61 + 32,10	60,61 + 32,10	60,61 + 32,10	60,61 + 32,10	56,76 + 32,62
	Suelo	90,14 + 34,72	89,74 + 34,62	89,62 + 34,59	90,00 + 34,69	85,25 + 35,51
	Total	150,75 + 66,04 ^a	150,35 + 65,95 ^a	150,23 + 65,92 ^a	150,61 + 66,90 ^a	142,01 + 67,29 ^a
Mediano (2045-2069)	Biomasa aérea	60,61 + 32,10	60,61 + 32,10	60,61 + 32,10	60,61 + 32,10	56,76 + 32,62
	Suelo	90,14 + 34,72	88,85 + 34,39	89,59 + 34,58	88,88 + 34,37	86,05 + 35,72
	Total	150,75 + 66,04 ^a	149,46 + 64,59 ^a	150,20 + 65,92 ^a	149,49 + 65,71 ^a	142,82 + 67,49 ^a
Lejano (2075-2099)	Biomasa aérea	60,61 + 32,10	60,61 + 32,10	60,61 + 32,10	60,61 + 32,10	54,97 + 33,11
	Suelo	90,14 + 34,72	87,98 + 34,07	91,72 + 35,12	88,43 + 34,28	93,49 + 40,67
	Total	150,75 + 66,04 ^a	148,59 + 65,43 ^a	152,36 + 66,42 ^a	149,0 + 65,6 ^a	148,47 + 68,79 ^a

* Modelo MPI_ESM-LR; **modelo HADGEM 2-ES; ***modelo GFDL_CM3; ****modelo CNRM_CM5. Medias seguidas de letras iguales indican diferencias no significativas entre diseños agroforestales y entre escenarios de cambio climático ($P<0,05$). / * Model MPI_ESM-LR; ** model HADGEM 2-ES; *** model GFDL_CM3; **** model CNRM_CM5. Means followed by the same letters indicate non-significant differences between agroforestry designs and between climate change scenarios ($P<0,05$).

En el caso de D2, se observó un incremento del C total en el horizonte cercano de 7,06, 1,11 y 8,44 t ha⁻¹ en el escenario 1, 2 y 4, pero disminuyó 6,20 t ha⁻¹ en el escenario 3. En el horizonte medio el C total decreció 0,95 y 4,61 t ha⁻¹ en el escenario 2 y 3. Sin embargo, aumentó 8,17 y 4,14 t ha⁻¹ en el escenario 2 y 4. En cuanto al horizonte lejano, se observó una reducción de C de 1,82 y 1,34 t ha⁻¹ en los escenarios 1 y 2, pero aumentó 2,71 y 9,98 t ha⁻¹ en los escenarios 3 y 4 (Cuadro 7).

Cuadro 7. Medias de las existencias de carbono en la biomasa aérea, suelo y C total $\pm$ SD (t ha⁻¹) simuladas con el modelo CO2Fix en un periodo de 50 años en D2= árboles de sombra - café - plátano en laderas evaluado en la Sociedad Catuái Amarillo S. de S.S, Chocamán, Veracruz, México, bajo los diferentes escenarios en los tres horizontes de tiempo (futuro cercano, medio y lejano). 2021.

Table 7. Means of carbon stocks in aerial biomass, soil, and total C $\pm$ SD (t ha⁻¹) simulated with the CO2Fix model over a period of fifty years in D2= shade trees - coffee - banana on slopes evaluated in the Sociedad Catuái Amarillo S. de SS, Chocaman, Veracruz, Mexico under the different scenarios in the three-time horizons (near, medium and distant future). 2021.

Horizontes de tiempo	Reservorio	Base	Carbono total (t ha ⁻¹)			
			Escenarios			
			1*	2**	3***	4****
D2 (árboles de sombra-café-plátano en laderas)						
Cercano (2015-2039)	Biomasa aérea	67,35 + 27,05	68,35 + 30,01	62,21 + 22,94	67,35 + 27,05	72,53 + 22,84
	Suelo	87,66 + 23,64	93,71 + 48,27	86,59 + 24,86	88,76 + 24,22	90,92 + 22,81
	Total	155,01 + 45,62 ^a	162,07 + 73,35 ^a	148,81 + 44,31 ^a	156,12 + 63,74 ^a	163,45 + 40,96 ^a
Mediano (2045-2069)	Biomasa aérea	67,35 + 27,05	68,35 + 30,01	62,04 + 27,08	72,46 + 22,91	67,39 + 22,84
	Suelo	87,66 + 23,64	85,71 + 26,47	88,36 + 24,13	90,72 + 22,70	91,76 + 23,01
	Total	155,01 + 45,62 ^a	154,06 + 53,27 ^a	150,40 + 47,19 ^a	163,18 + 41,04 ^a	159,15 + 41,11 ^a
Lejano (2075-2099)	Biomasa aérea	67,35 + 27,05	68,35 + 30,01	69,01 + 28,14	68,35 + 30,01	75,03 + 23,05
	Suelo	87,66 + 23,64	84,84 + 26,25	88,71 + 25,45	85,32 + 26,37	89,96 + 24,06
	Total	155,01 + 45,62 ^a	153,19 + 53,07 ^a	157,72 + 50,51 ^a	153,67 + 53,18 ^a	164,99 + 43,76 ^a

*Modelo **MPI_ESM-LR**; **modelo **HADGEM 2-ES**; ***modelo **GFDL_CM3**; ****modelo **CNRM_CM5**. Medias seguidas de letras iguales indican diferencias no significativas entre diseños agroforestales y entre escenarios de cambio climático ($P < 0,05$). / *Model **MPI_ESM-LR**; ** model **HADGEM 2-ES**; *** model **GFDL_CM3**; **** model **CNRM_CM5**. Means followed by the same letters indicate non-significant differences between agroforestry designs and between climate change scenarios ($P < 0,05$).

Para D3 las existencias totales de C en el horizonte cercano disminuyeron 3,11 y 1,23 t ha⁻¹ en el escenario 2 y 4 y se mantuvieron similares al escenario base en 1 y 3. En el horizonte medio la disminución se presentó en 1 y 2 (1,19 y 2,87 t ha⁻¹), pero se mantuvo constante en el escenario 4 y 3. En el horizonte lejano se observó una reducción del C total de 2,03, 1,57 y 0,77 t ha⁻¹ en 1, 2 y 4, respectivamente, mientras que en 4 se presentó un incremento de 1,48 t ha⁻¹ (Cuadro 8).

Cuadro 8. Medias de las existencias de carbono en la biomasa aérea, suelo y C total + SD (t ha^{-1}) simuladas con el modelo CO2Fix en un periodo de cincuenta años en D3= árboles de sombra - café (*C. arabica* L.) - plátano en el valle evaluado en la Sociedad Catuai Amarillo S. de S.S, Chocamán, Veracruz, México, bajo los diferentes escenarios en los tres horizontes de tiempo (futuro cercano, medio y lejano). 2021.

Table 8. Means of the carbon stocks in aerial biomass, soil, and total C + SD (t ha^{-1}) simulated with the CO2Fix model over a period of fifty years shade trees – coffee (*C. arabica* L.) - banana in the valley evaluated in the Sociedad Catuai Amarillo S. de SS, Chocaman, Veracruz, Mexico under the different scenarios in the three-time horizons (near, medium and distant future). 2021.

Horizontes de tiempo	Reservorio	Base	Carbono total (t ha ⁻¹)			
			Escenarios			
			1*	2**	3***	4****
D3 (árboles de sombra-café-plátano en el valle)						
Cercano (2015-2039)	Biomasa aérea	51,47 + 20,64	51,47 + 20,64	51,47 + 20,64	51,47 + 20,64	51,47 + 20,64
	Suelo	77,97 + 29,55	77,60 + 29,45	77,49 + 29,41	74,86 + 32,24	76,74 + 29,20
	Total	129,44 + 49,21 ^a	129,07 + 49,10 ^a	128,96 + 49,07 ^a	126,33 + 52,44 ^a	128,21 + 48,87 ^a
Mediano (2045-2069)	Biomasa aérea	51,47 + 20,64	51,47 + 20,64	51,47 + 20,64	51,41 + 22,61	51,47 + 20,64
	Suelo	77,97 + 29,55	76,78 + 29,21	77,46 + 29,40	75,17 + 31,66	77,50 + 29,42
	Total	129,44 + 49,21 ^a	128,25 + 48,87 ^a	128,93 + 49,06 ^a	126,57 + 53,32 ^a	128,97 + 49,08 ^a
Lejano (2075-2099)	Biomasa aérea	51,47 + 20,64	51,47 + 20,64	51,47 + 20,64	51,47 + 20,64	51,47 + 20,64
	Suelo	77,97 + 29,55	75,94 + 28,97	79,45 + 29,97	76,40 + 29,10	77,20 + 29,33
	Total	129,44 + 49,21 ^a	127,41 + 48,64 ^a	130,92 + 49,61 ^a	127,87+ 48,77 ^a	128,67 + 48,99 ^a

*Modelo **MPI_ESM-LR**; **modelo **HADGEM 2-ES**; ***modelo **GFDL_CM3**; ****modelo **CNRM_CM5**. Medias seguidas de letras iguales indican diferencias no significativas entre diseños agroforestales y entre escenarios de cambio climático ($P < 0,05$). SD: desviación estándar. / *Model **MPI_ESM-LR**; ** model **HADGEM 2-ES**; *** model **GFDL_CM3**; **** model **CNRM_CM5**. Means followed by the same letters indicate non-significant differences between agroforestry designs and between climate change scenarios ($P < 0,05$). SD: Standard deviation.

Discusión

Las existencias de C total se mantuvieron a lo largo del tiempo en los tres diseños agroforestales evaluados bajo las condiciones climáticas que se proyectaron en los diferentes escenarios, gracias a la permanencia de la cohorte de árboles dentro de los diseños agroforestales con café. Esta observación fue similar a lo que encontraron Ajit et al. (2017) en sistemas agroforestales de la India. El contenido de ABOC y COS en cada diseño agroforestal evaluado estuvo en función del manejo específico de los diseños agroforestales y de la selección de las especies arbóreas y arbustivas que se usaron como sombra (Rahn et al., 2018).

En la línea base se encontró que el mayor contenido de ABOC se presentó en D1, esto se pudo deber a la mayor densidad de árboles ($374 \text{ plantas/ha}^{-1}$) donde predominaron las especies del género *Inga* sp. (Cuadro 2). A pesar de que los árboles de este último género mencionado tuvieron baja capacidad para almacenar C (Ortiz-Ceballos et al., 2020), la alta densidad de siembra y rápido crecimiento, así como el aporte permanente de hojarasca, dieron como resultado un incremento significativo de ABOC en los cafetales (Nunes de Melo et al., 2019). Los resultados de ABOC en los diseños agroforestales donde predominaron las especies del género *Inga* sp. (D1 y D2) fueron

inferiores a los datos reportados por Ortiz-Ceballos et al. (2020), quienes registraron 55,12 t ha⁻¹ en sistemas agroforestales con café en la región Xalapa-Coatepec, Veracruz, México. Esto se pudo deber a la densidad de árboles e intensidad de manejo que se le dio a los diseños agroforestales evaluados (Salgado-Mora et al., 2018).

Los resultados de COS en la línea base fueron superiores a los que obtuvieron Balaba Tumwebaze y Byakagaba (2016) en sistemas agroforestales de café (54,01 t ha⁻¹) en un clima semicálido húmedo de Uganda. Pero fueron inferiores con los datos que reportaron Zaro et al. (2020), quienes encontraron que los suelos de algunos sistemas cafetaleros de Brasil almacenaron alrededor de 195,60 t ha⁻¹ de C. También fueron inferiores a los resultados generados por Chatterjee et al. (2020), en sistemas cafetaleros bajo sombra de Costa Rica que almacenaron hasta 146,6 t ha⁻¹ de C. El COS que se encontró en este estudio diferió con los resultados obtenidos por Chatterjee et al. (2020), Balaba Tumwebaze y Byakagaba (2016) y Zaro et al. (2020), debido a que las tipologías de los suelos fueron diferentes en cada región, además de que la influencia del clima y el manejo agronómico del sistema fueron determinantes en las reservas de COS (Jansson & Hofmockel, 2020).

Los resultados de la simulación de las reservas de ABOC en el escenario base a una proyección de cincuenta años que se generó con el modelo CO2Fix, fueron similares a los resultados obtenidos por Ajit et al. (2017), quienes reportaron 58,96 t ha⁻¹ en sistemas agroforestales de café en la India. El secuestro neto de C que se determinó en este estudio (0,89-0,62 t/ha/año) fue inferior a los que reportaron Negash y Kanninen (2015) (1,64 y 1,03 t/ha/año), en una simulación a cincuenta años realizada en sistemas agroforestales con café en Etiopía.

El COS simulado en los tres diseños agroforestales fue similar al que reportó Ehrenbergerová et al. (2016) (77,5 t ha⁻¹) en sistemas agroforestales con café de la Amazonía Peruana. El incremento del COS en los tres diseños agroforestales a los veinte años, se debió a la rotación del cultivo de café y a la rotación de la cohorte de plátano a los diez años en D2 y D3. El suelo, tanto en la línea base como en la simulación a cincuenta años, representó el mayor reservorio de C en los diseños agroforestales de café evaluados, tal como se registró en diversas investigaciones (Chatterjee et al., 2020; Ehrenbergerová et al., 2016; Solis et al., 2020).

Los resultados del C orgánico total en la línea base que se determinó en esta investigación fueron inferiores a los que reportaron Betemariyam et al. (2020) (194,96 t ha⁻¹) en sistemas agroforestales con café en Etiopía. Pero fueron superiores a los que obtuvieron Tschora y Cherubini (2020) (93,7 t ha⁻¹) en sistemas agroforestales con café de África. Las diferencias entre los resultados encontrados en esta investigación en comparación con los que reportaron estos estudios se pudo deber a que los niveles de C orgánico total que almacenó cada diseño agroforestal, estuvieron en función de la acción conjunta de las especies arbóreas y arbustivas, así como de los factores fisiográficos, edáficos, climáticos y de manejo (Madountsap Tagnang et al., 2019).

Los resultados del C total simulados con el modelo CO2Fix en el periodo de cincuenta años fueron superiores a los que simularon Fekadu Hailu et al. (2021) (121,1 t ha⁻¹) en un periodo de 63 años en sistemas agroforestales con café en Etiopía. Pero fueron inferiores a los que simularon Negash y Kanninen (2015) (209-301 t ha⁻¹) en un periodo de cincuenta años en sistemas agroforestales con café de Etiopía. Las variaciones entre el C total proyectado a cincuenta años en este estudio comparado con los resultados obtenidos por Fekadu Hailu et al. (2021) y Negash y Kanninen (2015), se pudo deber a que la cantidad de C total almacenado a través del tiempo dependió de la densidad de árboles/ ha, la composición y selección de las especies, la edad de rotación, así como de un suministro continuo de materia orgánica al suelo y la condición fisiográfica del sitio (Salgado-Mora et al., 2018). Por lo tanto, el diseño y manejo de los sistemas agroforestales con café fueron fundamentales en las reservas de C que el sistema almacenaría en el futuro (Chatterjee et al., 2020).

La variación de las reservas de C total que se determinó en esta investigación bajo escenarios de cambio climático, se pudo deber al incremento de la temperatura media anual (°C) y de ET₀ (mm) en los meses del periodo de crecimiento, así como a la disminución en la precipitación anual (mm) (Cuadro 5). De acuerdo con Chen et al. (2020), el aumento de las temperaturas son responsables de estimular la pérdida neta de C del suelo, debido a que se incrementa la actividad microbiana. Se ha reportado que la disminución de la precipitación prolongada en

climas cálidos, da como resultado pérdidas de C del ecosistema, debido a una menor productividad primaria neta y actividad microbiana, lo que sugiere la posibilidad de pérdidas netas de C en el suelo (Jansson & Hofmockel, 2020). Esto podría explicar porque en D1 y D3 se observó de manera general una disminución en el contenido de C en todos los escenarios (Cuadro 6 y 8). La disminución de las reservas de C bajo escenarios de cambio climático en D1 y D3, coincidió con lo que determinaron Lozano-García et al. (2017), quienes reportaron pérdidas en las reservas de COS bajo escenarios de cambio climático y uso de la tierra en un encinar mediterráneo de España.

La tendencia al alza en las existencias de C total que se observaron en D2 en algunos escenarios (Cuadro 7), podría deberse a que el aumento de la temperatura ocasionó un mayor incremento de biomasa, debido a que se hace más eficiente la fotosíntesis de las plantas (Cox et al., 2013). Las variaciones en el tipo de especies arbóreas que se usaron para sombra del cafeto, así como su productividad, las cuales estuvieron vinculadas al cambio climático, fueron las que regularon las tasas a las que el C se fijó de la atmósfera a través de la fotosíntesis y se almacenó en el suelo a largo plazo (Jansson & Hofmockel, 2020).

Aunque esta investigación demostró la relevancia del uso de árboles de sombra dentro de los diseños agroforestales con café para mantener las reservas de C bajo distintos escenarios, es importante señalar que no se consideraron cambios en la variable de manejo del sistema, además de que se tomaron los valores por defecto sobre la descomposición microbiana y humificación del suelo a la hora de correr el modelo CO2Fix para simular las reservas de C a una proyección de cincuenta años bajo la línea base y con escenarios de cambio climático. Esto podría generar incertidumbre en los resultados obtenidos. Por lo que, se necesitan nuevos trabajos de investigación que simulen los cambios en las existencias de C, mediante la manipulación de la variable de manejo del sistema agroforestal y se considere medir en campo la tasa de descomposición microbiana y humificación del suelo.

Conclusión

Fue posible simular a una proyección de cincuenta años, las reservas de carbono en la biomasa aérea y suelo en la línea base y bajo los diferentes escenarios de cambio climático mediante el uso del modelo CO2Fix, en sistemas agroforestales con café que pertenecen a la Sociedad Catuaf Amarillo S. de S.S., ubicados en la comunidad de Chocamán, Veracruz, México.

Las reservas de C se mantuvieron a través del tiempo a causa de la permanencia de la cohorte de árboles, que fue la principal fuente de almacenaje del carbono en la biomasa aérea y suelo, tanto en la línea base como en los distintos escenarios evaluados. Sin embargo, se observaron variaciones en las reservas de C total en los tres diseños agroforestales estudiados en la línea base y bajo los diferentes escenarios, debido a la densidad de árboles en cada diseño agroforestal, así como por el incremento de la temperatura media anual (°C) y de ET_0 (mm) en los meses del periodo de crecimiento, y a la disminución en la precipitación anual (mm).

Es fundamental mantener los árboles de usos múltiples dentro de los diseños agroforestales con café a través del tiempo, para evitar pérdidas en las reservas de C total en el futuro.

Se necesitan estudios que tengan un enfoque integrado para implementar las mejores prácticas de manejo en los sistemas agroforestales con café, además de que permitan mejorar los almacenes de C bajo escenarios de cambio climático y aumenten su resiliencia ante un clima cambiante.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). A la Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia y Suelos, así como al Programa de Doctorado en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sustentable. A los productores de la Sociedad Catuaf Amarillo S. de S.S. por su apoyo a lo largo de esta investigación.

Referencias

- Ajit, Dhyani, S. K., Handa, A. K., Newaj, R., Chavan, S. B., Alam, B., Prasad, R., Ram, A., Rizvi, R. H., Jain, A. K., Uma., Tripathi, D., Shakhela, R. R., Patel, A. G., Dalvi, V. V., Saxena, A. K., Parihar, A. K. S., Backiyavathy, M. R., Sudhagar, R. J., ... Gunasekaran, S. (2017). Estimating carbon sequestration potential of existing agroforestry systems in India. *Agroforestry Systems*, 91, 1101–1118. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9986-z>
- Alder, D., & Silva, J. N. M. (2000). An empirical cohort model form management of *Terra Firme* forests in the Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management*, 130(1–3), 141–157. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00196-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00196-6)
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Álvarez Arteaga, G., Ibáñez Huerta, A., García Calderón, N. E., & Almendros Martín, G. (2012). Almacenes de carbono y estabilidad de la materia orgánica del suelo en un agroecosistema cafetalero en la Sierra Sur de Oaxaca, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 15, 611–620. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/68299>
- Álvarez, S., & Rubio, A. (2016). Wood Use and Forest Management for Carbon Sequestration in Community Forestry in Sierra Juárez, Mexico. *Small-Scale Forestry*, 15, 357–374. <https://doi.org/10.1007/s11842-016-9325-2>
- Balaba Tumwebaze, S., & Byakagaba, P. (2016). Soil organic carbon stocks under coffee agroforestry systems and coffee monoculture in Uganda. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 216, 188–193. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.037>
- Betemariyam, M., Negash, M., & Worku, A. (2020). Comparative analysis of carbon stocks in home garden and adjacent coffee based agroforestry systems in Ethiopia. *Small-Scale Forestry*, 19, 319–334. <https://doi.org/10.1007/s11842-020-09439-4>
- Brigido, J. G., Nikolskii I., Terrazas, L., & Herrera, S. S. (2015). Estimación del impacto del cambio climático sobre fertilidad del suelo y productividad de café en Veracruz, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 101–116. http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/issue/view/373/pdf_11
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. (2019). *Comercio internacional del café, el caso de México*. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. <http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/94Caf%C3%A9%20-Producci%C3%B3n%20y%20Consumo.pdf>
- Chatterjee, N., Ramachandran Nair, P. K., Nair, V. D., Bhattacharjee, A., Virginio Filho, E. M., Muschler, R. G., & Noponen, M. R. A. (2020). Do coffee agroforestry systems always improve soil carbon stocks deeper in the soil?—A case study from Turrialba, Costa Rica. *Forests*, 11, Article 49. <https://doi.org/10.3390/f11010049>
- Chen, J., Elsgaard, L., van Groenigen, K. J., Olesen, J. E., Liang, Z., Jiang, Y., Laerke, P. E., Zhang, Y., Luo, Y., Hungate, B. A., Sinsabaugh, R. L., & Jorgensen, U. (2020). Soil carbon los with warming: New evidence from carbon-degrading enzymes. *Global Change Biology*, 26, 1944–1952. <http://doi.org/10.1111/gcb.14986>
- Comisión Nacional del Agua - Servicio Meteorológico Nacional. (s.f.). *Base de datos del CLICOM*. Recuperado el 25 junio, 2020, de <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>

- Cox, P. M., Pearson, D., Booth, B. B., Friedlingstein, P., Huntingford, C., Jones, C. D., & Luke, C. M. (2013). Sensitivity of tropical carbon to climate change constrained by carbon dioxide variability. *Nature*, 494, 341–344. <https://doi.org/10.1038/nature11882>
- Ehrenbergerová, L., Cienciala, E., Kucˇera, A., Guy, L., & Habrová, H. (2016). Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru. *Agroforestry Systems*, 90, 433–445. <http://doi.org/10.1007/s10457-015-9865-z>
- Elms, R. (2019). *Mexican coffee production continues to rebound from coffee rust disease*. United States Department of Agriculture. <https://bit.ly/3tclpuw>
- Fekadu Hailu, A. F., Soremessa T., & Warkineh Dullo, B. (2021) Carbon sequestration and storage value of coffee forest in Southwestern Ethiopia. *Carbon Management*, 12(5), 531–548. <https://doi.org/10.1080/17583004.2021.1976>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (5ª ed.). Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (2013). *Continuo nacional de unidades edafológicas Serie II. Conjunto de datos de perfiles de suelos Escala 1, 250 000 Serie II*. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Summary for policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 3–32). Cambridge University Press.
- Jansson, J. K., & Hofmockel, K. S. (2020). Soil microbiomes and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, 18, 35–46. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0265-7>
- Kim, H., Kim, Y. -H., Kim, R., & Park, H. (2015). Reviews of forest carbon dynamics models that use empirical yield curves: CBM-CFS3, CO2FIX, CASMOFOR, EFISCEN. *Forest Science and Technology*, 11(4), 212–222. <https://doi.org/10.1080/21580103.2014.987325>
- Kuyah, S., Dietz J., Muthuri, C., Jamnadass, R., Mwangi, P., Coe, R., & Neufeldt, H. (2012). Allometric equations for estimating biomass in agricultural landscapes: I. aboveground biomass. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 158, 216–224. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.05.011>
- Lozano-García, B., Muñoz-Rojas, M., & Parras-Alcántara, L. (2017). Climate and land use changes effects on soil organic carbon stocks in a Mediterranean semi-natural area. *Science of the Total Environment*, 579, 1249–1259. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.111>
- Madountsap Tagnang, N., Zapfack, L., Chimi Djomo, C., Kabelong Banoho, L. -Paul., Forbi Preasious, F., Tsopmejjio Temfack, I., Tajeukem Vice, C., Ntonmen Yonkeu, A. F., Tabue Mboba, R. B., & Nasang, J. M. (2019). Carbon storage potential of cacao agroforestry systems of different age and management intensity. *Climate and Development*, 11(7), 543–554. <https://doi.org/10.1080/17565529.2018.1456895>
- Masera, O. R., Garza-Caligaris, J. F., Kanninen, M., Karjalainen, T., Liski, J., Nabuurs, G. J., Pussinen, A., de Jong, B. H. J., & Mohren, G. M. J. (2003). Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: The CO2FIX V.2 approach. *Ecological Modelling*, 164(2–3), 177–199. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00419-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00419-2)

- Masuhara, A., Valdés, E., Pérez J., Gutiérrez, D., Vázquez, J. C., Salcedo, E., Juárez, M. J., & Merino, A. (2015). Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 4(1), 66–93. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5271975>
- Návar Cháidez, J. J., González, N., & Graciano, J. (2005). Carbon stocks and fluxes in reforested sites of Durango, Mexico. *Madera y Bosques*, 11(2), 15–34. <https://doi.org/10.21829/myb.2005.1121254>
- Negash, M., & Kanninen, M. (2015). Modeling biomass and soil carbon sequestration of indigenous agroforestry systems using CO2FIX approach. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 203, 147–155. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2015.02.004>
- Negash, M., Starr, M., & Kanninen M. (2013). Allometric Equations for biomass estimation of Enset (*Ensete Ventricosum*) grown in indigenous agroforestry systems in the Rift Valley escarpment of southern-eastern Ethiopia. *Agroforestry Systems*, 87, 571–581. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9577-6>
- Nunes de Melo, L., Feitosa de Souza, T. A., & Santos, D., (2019). Transpiratory rate, biomass production and leaf macronutrient content of different plant species cultivated on a regosol in the Brazilian Semiarid. *Russian Agricultural Sciences*, 45(2), 147–153. <https://doi.org/10.3103/S1068367419020150>
- Nyombi, K., van Asten, P. J. A., Leffelaar, P. A., Corbeels, M., Kaizzi, C. K., & Giller, K. E. (2009). Allometric growth relationships of East Africa highland bananas (*Musa* AAA-EAHB) Cv. Kisansa and Mbwazirume. *Annals of Applied Biology*, 155(3), 403–418. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00353.x>
- Ordóñez Díaz, J. A. B., Galicia Naranjo, A., Venegas Mancera, N. J., Hernández Tejeda, T., Ordóñez Díaz, M. J., & Dávalos-Sotelo, R. (2015). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y Bosques*, 21, 77–126. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.210428>
- Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura., & Unión Internacional de Ciencias del Suelo. (2015). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014. Sistema internacional de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos*. FAO. <https://www.fao.org/3/i3794es/I3794ES.pdf>
- Ortiz-Ceballos, G. C., Vargas-Mendoza, M., Ortiz-Ceballos, A. I., Mendoza Briseño, M., & Ortiz-Hernández, G. (2020). Aboveground carbon storage in coffee agroecosystems: The case of the central region of the state of Veracruz in Mexico. *Agronomy*, 10(3), Article 382. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030382>
- Parada-Molina, P. C., Cerdán, C. R., Ortiz Ceballos, G., Barradas Miranda, V. L., & Cervantes-Pérez, J. (2020). *Hemileia vastatrix*: una prospección ante el cambio climático. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 7(3), Artículo e2507. <https://doi.org/10.19136/era.a7n3.2507>
- Parada-Molina, P. C., Cervantes-Pérez, J., Ruiz-Molina, V. E., & Cerdán-Cabrera, C. R. (2020). Efectos de la variabilidad de la precipitación en la fenología del café: caso zona cafetalera Xalapa-Coatepec, Veracruz, Mex. *Revista Ingeniería y Región*, 24, 61–71. <https://doi.org/10.25054/22161325.2752>
- Rahn, E., Vaast, P., Läderach, P., van Asten, P., Jassogne, L., & Ghazoul, J. (2018). Exploring adaptation strategies of coffee production to climate change using a process-based model. *Ecological Modelling*, 371, 76–89. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.01.009>
- Ruiz-García, P., Conde-Álvarez, C., Gómez-Díaz, J. D., & Monterroso-Rivas, A. I. (2021). Projections of local knowledge-based adaptation strategies of mexican coffee farmers. *Climate*, 9(4), Article 60. <https://doi.org/10.3390/cli9040060>

- Ruiz-García, P., Gómez-Díaz, J. D., Valdes-Velarde, E., Tinoco-Rueda, J. A., Flores-Ordoñez, M., & Monterroso-Rivas, A. I. (2020). Caracterización biofísica y de composición estructural en sistemas agroforestales de café orgánico de Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(2), Artículo 37. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/3102/1415>
- Salgado-Mora, M. G., Ruiz-Bello, C., Moreno-Martínez, J. L., Irena-Martínez, B., & Aguirre-Medina, J. F. (2018). Captura de carbono en biomasa aérea de árboles de sombra asociados a *Coffea arabica* L. en el Soconusco Chiapas, México. *AgroProductividad*, 11(2), 120–126. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/136>
- Schelhaas, M. J., van Esch, P. W., Groen, T. A., de Jong, B. H. J., Kanninen, M., Liski, J., Masera, O., Mohren, G. M. J., Nabuurs, G. J., Palosuo, T., Pedroni, L., Vallejo, A., & Vilén, T. (2004). *CO2FIX V 3.1 - a modelling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems*. Wageningen University. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/43524>
- Segura, M., Kanninen, M., & Suárez D. (2006). Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems*, 68, 143–150. <https://doi.org/10.1007/s10457-006-9005-x>
- Solis, R., Vallejos-Torres, G., Arévalo, L., Marín-Díaz, J., Ñique-Alvarez, M., Engedal, T., & Bruun, T. (2020). Carbon stocks and the use of shade trees in different coffee growing systems in the Peruvian Amazon. *The Journal of Agricultural Science*, 158(6), 450–460. <https://doi.org/10.1017/S002185962000074X>
- Soto-Pinto, L., & Aguirre-Dávila, C. M. (2015). Carbon stocks in organic coffee systems in Chiapas, Mexico. *Journal of Agricultural Science*, 7(1), 117–128. <https://doi.org/10.5539/jas.v7n1p117>
- Tschora, H., & Cherubini, F. (2020). Co-benefits and trade-offs of agroforestry for climate change mitigation and other sustainability goals in West Africa. *Global Ecology and Conservation*, 22, Article e00919. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00919>
- Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales. (2020). *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación*. Instituto de Ciencias en la Atmósfera y Cambio Climático. <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas>
- Zaro, G. C., Caramori, P. H., Yada Junior, G. M., Sanquetta, C. R., Androcioli Filho, A., Nunes, A. L. P., Prete, C. E. C., & Voroney, P. (2020). Carbon sequestration in an agroforestry system of coffee with rubber trees compared to open-grown coffee in southern Brazil. *Agroforestry Systems*, 94, 799–809. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00450-z>