

ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LA CADENA PRODUCTIVA DE CAFÉ ORGÁNICO BAJO SOMBRA

Villa-Herrera Adán^{1*}; Salvador-Castillo José M.¹; Ramírez-Armas Luz M.¹ y Bolaños-González Martín A.¹

¹Posgrado en Hidrociencias, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados, Carr. México-Texcoco km 36.5, Montecillo C.P. 56264. Texcoco, Estado de México, México.

*Autor para correspondencia: adan123avh@hotmail.com

Resumen

La producción de alimentos genera casi un tercio de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI). En este escenario, la huella de carbono (HC) cuantifica las emisiones de GEI en las fases involucradas en la generación de un producto, ofreciendo una métrica estándar para evaluar su impacto ambiental. El objetivo de esta investigación fue estimar la HC de la cadena productiva de café orgánico cultivado por la cooperativa Comon Yaj Noptic SPR de RL, ubicada en La Concordia, Chiapas. Para ello se utilizó información obtenida mediante entrevistas y datos medidos durante la cosecha, además, se usaron los factores de emisión reportados en la Guía de Buenas Prácticas del Panel Intergubernamental de Cambio Climático en su refinamiento de 2019. Se encontró que las emisiones de GEI desde el manejo de la parcela hasta la obtención del café pergamino fue de 0.620 kg de CO_{2e}, y desde éste al empaque del café molido fue de 0.415 kg CO_{2e} kg⁻¹ de café verde producido. Así, los GEI emitidos en toda la cadena productiva fueron de 1.034 kg de CO_{2e} kg⁻¹ de café verde. En contraparte, se estimó que el sistema agroforestal capturó en promedio 20.486 kg CO_{2e}, resultando en una HC de -19.452 kg CO_{2e} kg⁻¹ de café verde, demostrando que este sistema agroforestal captura más CO₂ del que emite. Los resultados muestran la sostenibilidad de estos sistemas agroforestales, y subrayan la necesidad de apoyar a los pequeños productores en su adopción y mantenimiento.

Palabras clave: *Coffea arabica*, sistemas agroforestales, gases de efecto invernadero.

Abstract

Food production contributes nearly a third of all global greenhouse gas (GHG) emissions. In this context, the carbon footprint (CF) measures the GHG emissions throughout a product's life cycle. This research aimed to estimate the CF of the production chain of organic coffee grown by the cooperative Comon Yaj Noptic SPR de RL, located in La Concordia, Chiapas. Data were gathered from interviews and measurements during harvest and, in addition, supplemented by emission factors from the 2019 Good Practice Guide by the Intergovernmental Panel on Climate Change. GHG emissions, starting from plot cultivation to the parchment coffee stage, were quantified at 0.620 kg of CO_{2e}, and from this stage to the ground coffee packaging, it amounted to 0.415 kg CO_{2e} kg⁻¹ of green coffee. This brought the total GHG emissions of the entire production chain to 1.034 kg of CO_{2e} kg⁻¹ of green coffee. In contrast, it was estimated that the agroforestry system captured an average of 20,486 kg CO_{2e}, leading to a net CF of -19.452 kg CO_{2e} kg⁻¹ of green coffee. This underscores that the agroforestry system mitigates more CO₂ than it releases. The results demonstrate the sustainability of these agroforestry systems and highlight the need to support small producers in their adoption and maintenance.

Key words: *Coffea arabica*, agroforestry systems, greenhouse gases.

Introducción

La caficultura en el estado de Chiapas, entidad reconocida por su rica tradición cafetalera, no solo brinda sustento económico a miles de productores, sino que también representa un modelo de prácticas agrícolas sostenibles. Aunque dominada por la forma convencional de cultivo, con sus consecuencias ambientales como la pérdida de biodiversidad y la contaminación debido al uso de fertilizantes sintéticos (Escamilla, 2007), diferentes regiones de Chiapas han experimentado un giro hacia la producción orgánica bajo sombra. Esta transformación, favorecida por la creciente demanda mundial de productos sostenibles, se ve impulsada por sistemas agroforestales que no solo conservan la biodiversidad y mejoran la salud del suelo, sino que también contribuyen a mitigar los impactos del cambio climático (CMCC, 1994).

La problemática global del cambio climático debido al incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por actividades antropogénicas, enfatiza la necesidad urgente de comprender y minimizar nuestra huella de carbono (HC); la cual se define como la cantidad de emisiones de GEI a la atmósfera por parte de un individuo, organización, proceso, producto o evento dentro de un límite específico (Pandey *et al.*, 2011). En este contexto, la HC ofrece una representación tangible de las emisiones de GEI de un producto o proceso, desde simples emisiones de CO₂ hasta complejas mediciones de ciclo de vida (Schneider y Samaniego, 2010). En el sector agrícola, por ejemplo, se emiten GEI como el CO₂ por el uso de combustibles fósiles, el CH₄ de la oxidación anaeróbica de materia orgánica y el N₂O por el uso de fertilizantes nitrogenados (FAO, 2017).

Este estudio tuvo como objetivo principal cuantificar la HC del café orgánico cultivado en sistemas agroforestales por la sociedad cooperativa Comon Yaj Noptic SPR de RL. Mediante este análisis, se generó información para ayudar a identificar estrategias para optimizar y reducir la HC de este modelo productivo, además de informar a consumidores y comercializadores sobre el impacto ambiental del café procedente de esta organización y del sistema de manejo.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se centró en las parcelas de los productores que integran a la cooperativa de café orgánico Comon Yaj Noptic SPR de RL, con sede en la comunidad de Nuevo Paraíso, La Concordia, Chiapas. Esta se fundó el 19 de mayo de 1995 e integra a 141 productores de 13 comunidades (Figura 1), cuya proporción es de 31.9% mujeres y 68.1% hombres, los cuales cuentan con una superficie de 93.95 y 219.34 ha, respectivamente. De acuerdo con la estación climatológica más cercana a la zona de estudio, 00007037 Finca Cuxtepeques (SMN, 2023) ubicada a 15°43' 43" latitud norte N, 92°58'08" longitud oeste y 1550 msnm, la temperatura promedio de la zona es de 22.4 °C y la precipitación media anual de 2151.3 mm.

Recopilación de datos

La etapa de reconocimiento de las unidades de producción y primera fase de recolección de datos se efectuó entre los meses de julio a octubre de 2022. Después, en febrero de 2023, durante la temporada de cosecha, se realizó un nuevo recorrido de campo para recopilar evidencias sobre el ciclo productivo del café (prácticas de cultivo, transporte y procesamiento). Para ello se realizaron entrevistas detalladas con productores de las 13 comunidades (Figura 1) y se analizaron fichas técnicas que describen el manejo específico de cada parcela de café. Al concluir el proceso de recopilación de información, se construyó una base de datos que consolidó la información de los 141 productores con 161 parcelas bajo su manejo. Posteriormente se homogeneizó la información recopilada transformando a valores de rendimiento en kg de café verde por hectárea (kg ha⁻¹). Por lo cual, en la fase de campo se determinaron los kg de café cereza necesarios para obtener un quintal de café pergamino (270 kg de cereza para obtener 57.5 kg de

café pergamino), así como la cantidad de café pergamino para generar un kg de café verde (1.282 kg de pergamino para obtener un kg de semilla verde).

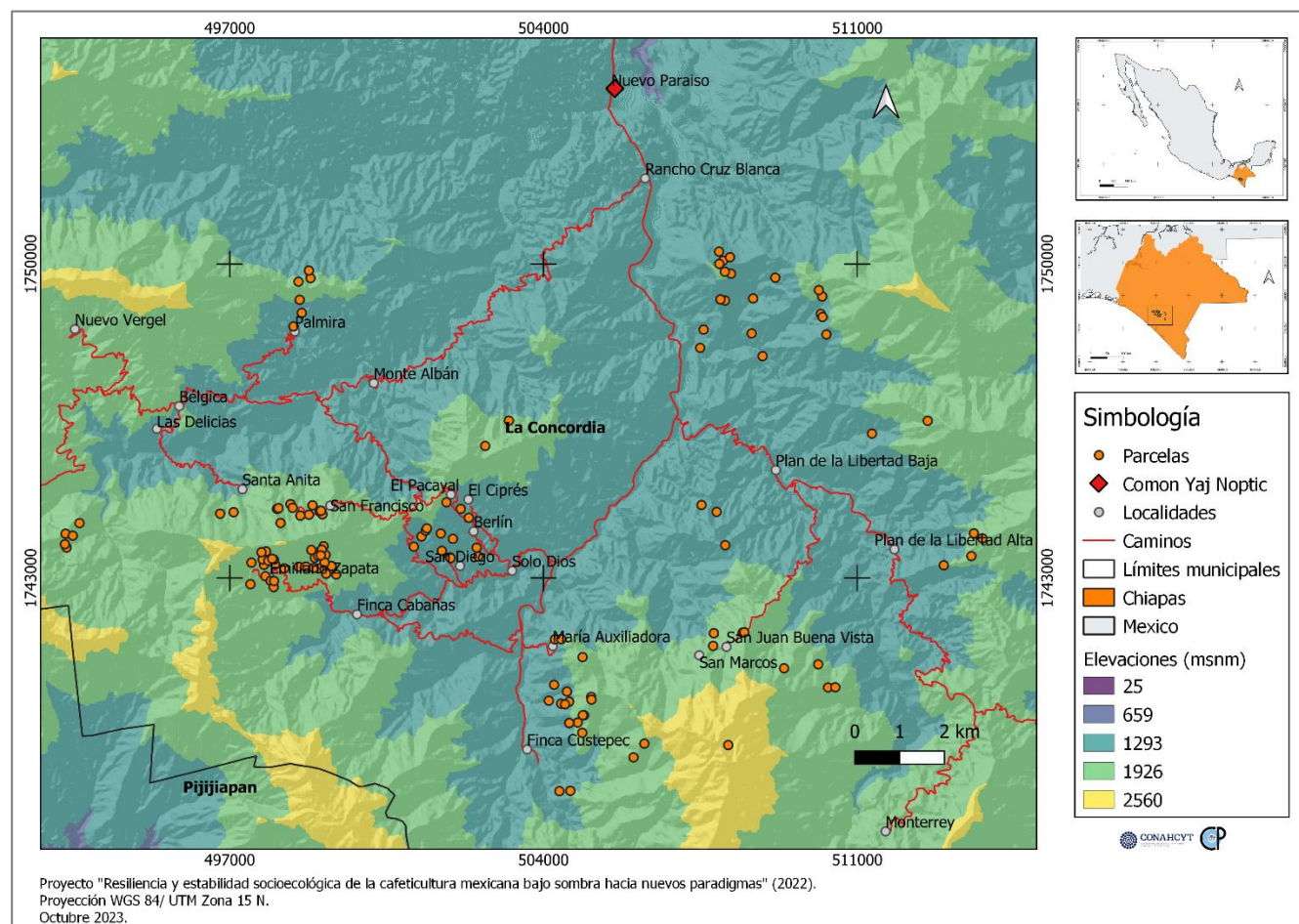


Figura 1. Ubicación de las parcelas de los productores de la cooperativa de café orgánico Comon Yaj Noptic en el municipio de La Concordia, Chiapas.

Cálculo de la huella de carbono

Para el ciclo productivo 2022-2023, se consideró la HC desde la fase primaria de manejo de parcelas, pasando por el beneficio húmedo, hasta el empaclado del café molido. Durante estas etapas, se estimaron las emisiones de GEI originadas por la aplicación de insumos, el uso de combustibles para el transporte, los procesos de despulpado y beneficiado del café utilizando diferentes factores de emisión para calcular las emisiones de CO_{2e}. Como resultado, se obtuvo el valor de la HC en kg de CO_{2e} kg⁻¹ de café verde producido.

Estimación de carbono almacenado por el sistema agroforestal

La cantidad de carbono que los sistemas agroforestales capturan anualmente de la atmósfera, mediante su proceso de fotosíntesis, se estimó usando el perfeccionamiento de 2019 de las Directrices del Panel Intergubernamental de Cambio Climático de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC, 2019). Por la forma en que se manejó la información recopilada la cantidad de carbono capturada también se estimó en kg de CO_{2e} kg⁻¹ de café verde.

Análisis de datos

La información se gestionó mediante hojas de cálculo de Excel®, y en seguida, se calcularon las estadísticas descriptivas y se elaboraron gráficas de cajas con R (versión 4.3.1) y su interfaz R-studio (versión 2023.6.0.421, R Core Team, 2023). Se determinaron las emisiones totales de GEI y se contrastaron con la cantidad de carbono que el sistema agroforestal puede capturar. Esta comparación proporcionó una evaluación de la HC neta del proceso de producción de café orgánico en la zona de estudio.

Resultados y discusión

Al evaluar algunas de las variables asociadas a los sistemas de producción de café (Cuadro 1), es evidente que existe variabilidad en las distintas mediciones registradas, lo que proporciona una visión amplia de las condiciones en los sistemas de producción de café. La superficie de las parcelas fue desde las 0.50 hasta 6.00 ha. La altitud a la que se ubican las parcelas de café también mostró un amplio rango (1077 m), encontrándose que la producción de café se desarrolla en diversas condiciones altitudinales, lo que podría impactar la calidad y características del grano.

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de algunas variables analizadas para estimar la huella de carbono.

Variables	Unidades	Mínimo	Máxima	Mediana	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Superficie	ha	0.50	6.00	1.50	1.95	1.276	0.656
Altitud	m	769	1846	1429	1369.2	225.935	0.165
Densidad de siembra	Plantas ha-1	1050	18300	4133.3	4574.1	2454.860	0.537
Edad	Años	1.7	26.0	9.3	10.1	5.465	0.542
Especies de sombra	Cantidad	1	50	12	13.2	5.754	0.436
Rendimiento	qq ha-1	1	40	10.0	12.8	8.460	0.663
Distancia	km	12.43	32.50	22.04	21.96	5.915	0.269

La densidad de siembra presentó una notable variabilidad, lo que sugiere que existen diferentes prácticas agronómicas adoptadas por los productores. Además, las plantaciones de café tuvieron edades que fueron desde 1.7 hasta 26 años, por lo que existen tanto cultivos jóvenes como plantaciones viejas, lo que puede tener implicaciones en el rendimiento y la calidad del café. Asimismo, la cantidad de especies de árboles de sombra fluctuó desde 1 hasta 50, con una media de 12 especies presentes por parcela. Esto no sólo beneficia la biodiversidad, sino que también influyen en la cantidad de CO₂ capturado (Casanova-Lugo *et al.*, 2016) y en la prestación de otros servicios ecosistémicos de regulación, como el ajuste del clima, la erosión, fertilidad del suelo, control biológico de plagas y enfermedades, y humedad del suelo (Villarreyna *et al.*, 2020).

Por otro lado, el rendimiento osciló desde 1 hasta 40 qq ha⁻¹. El coeficiente de variación de 0.663 refleja una alta variabilidad en el rendimiento, lo que podría deberse a diferencias en las prácticas de manejo y las condiciones del suelo. Por último, la distancia varió desde 12.43 hasta 32.50 km, su coeficiente de variación de 0.269 indica una variabilidad moderada en las distancias desde las instalaciones de la cooperativa hasta las parcelas de café.

En las gráficas de cajas (Figura 2) se presentan los datos relacionados con el carbono en la producción de café. La cantidad de carbono capturada varió desde de 3.99 a 154.97 kg CO₂e kg⁻¹ de café verde. Esta amplia variabilidad es evidenciada por un coeficiente de variación de 0.937. Además, se obtuvo una mediana de 15.98 y una media de 20.49 kg CO₂e kg⁻¹ de café verde, indicando que las parcelas analizadas

tienen una buena capacidad de capturar carbono. En estudios realizados en Costa Rica, se encontró que la tasa de fijación de carbono en café bajo sombra en promedio fue de $7.6 \text{ kg CO}_2\text{e kg}^{-1}$ de café verde, con un rango entre 5.0 y 17.6 (Segura y Andrade, 2010). Por su parte, Porras *et al.* (2015) reportó en cafetales bajo sombra de Nicaragua una captura promedio de $1.83 \text{ CO}_2\text{e kg}^{-1}$ de café verde, pero solo para la biomasa viva arbórea sobre el suelo. Los resultados encontrados en este estudio son reflejo en buena medida del porcentaje alto de sombra arbórea y los rendimientos de café bajos.

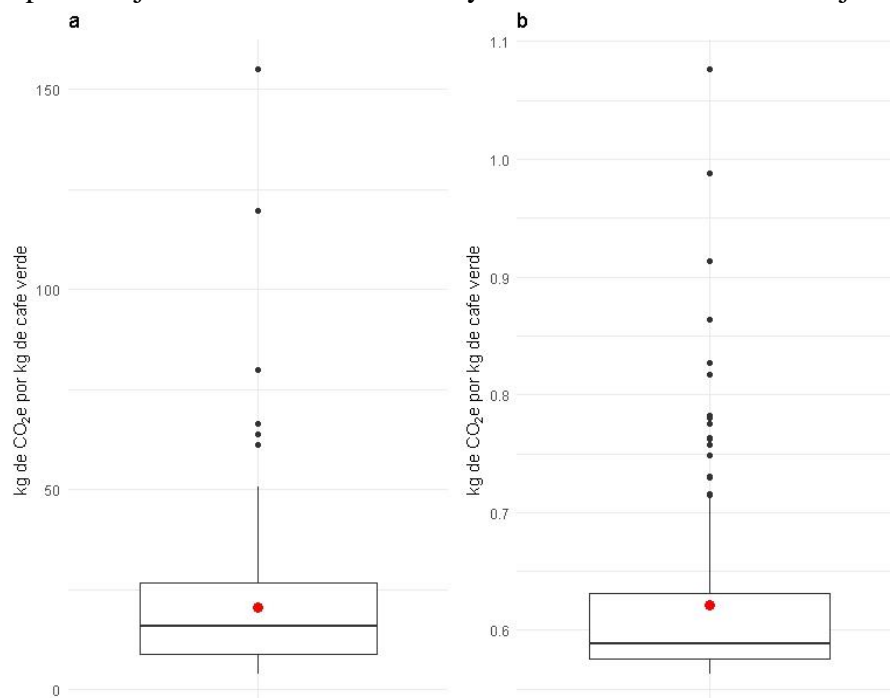


Figura 2. Cantidad de carbono capturado por el agroecosistema (a) y emisiones de GEI de la cadena productiva del café, desde el manejo de la plantación hasta la obtención del pergamino (b).

En cuanto a la HC desde el manejo de la plantación hasta la obtención del pergamino, los valores se encontraron en un rango de 0.560 a $1.080 \text{ kg CO}_2\text{e kg}^{-1}$ de café verde. El coeficiente de variación de 0.127, indica que existe poca variabilidad en esta métrica en comparación con la captura de CO₂. Además, la mediana (0.589) y la media (0.620) cercanas sugieren que la mayoría de los sistemas tienen un impacto ambiental similar en esta etapa de la producción.

El análisis detallado de la HC desde el manejo de la parcela hasta la obtención de café pergamino, mostró que el despulpado y las emisiones resultantes de los residuos representaron el mayor impacto, con un promedio de $0.561 \text{ kg de CO}_2\text{e emitidos por cada kilogramo de café verde}$. Esta cifra es muy amplia en comparación con las otras etapas y resalta la importancia de abordar los residuos y su tratamiento como un área clave para la reducción de emisiones. La gestión adecuada de los residuos y la exploración de tecnologías más sostenibles de despulpado podrían ser cruciales para disminuir esta cifra.

Por otro lado, la aplicación de PSD y el transporte de insumos también tienen contribuciones considerables, con 0.0271 y $0.0133 \text{ kg de CO}_2\text{e kg}^{-1}$ de café verde, respectivamente. Aunque estos valores son menores en comparación con el despulpado, no deben ser subestimados. La optimización de rutas de transporte, la elección de medios de transporte más eficientes y la revisión de las prácticas de aplicación de PSD podrían ser áreas de mejora.

En conjunto, la HC promedio desde el manejo de la parcela hasta la obtención del café pergamino se situó en $0.6204 \text{ kg de CO}_2\text{e kg}^{-1}$ de café verde. Si bien algunas etapas tienen un mayor impacto que otras, es fundamental abordar cada una de ellas con un enfoque holístico para alcanzar una producción más sostenible. En un estudio realizado en Honduras, la HC fue de $3.42 \text{ kg CO}_2\text{e kg}^{-1}$ de café verde, siendo la

etapa de cultivo la de mayor relevancia con 1.74 kg CO_{2e} kg⁻¹ café verde, en buena medida debido a la fertilización química, que resultó en emisiones de óxido nitroso elevadas, seguido de la etapa de procesado con 1.10 kg CO_{2e} kg⁻¹ café oro (Albornoz, 2017).

De acuerdo con los datos recopilados, la HC del procesamiento en la cooperativa fue de 0.4145 kg de CO_{2e} kg⁻¹ de café verde. Analizando de forma individual cada actividad del procesamiento, el tostado utilizando gas LP contribuyó más a la HC, con 0.2863 kg de CO_{2eq} kg⁻¹ de café verde. Este valor fue superior a las otras actividades, destacando la relevancia de considerar alternativas más limpias o eficientes en términos energéticos para el proceso de tostado.

Por otro lado, actividades como el pesado con báscula y el empaclado con selladora fueron impactos mínimos, con 0.0006 y 0.0019 kg de CO_{2eq} kg⁻¹ de café verde, respectivamente. Aunque estas contribuciones resultaron menores en comparación con el tostado, es esencial considerar cada etapa para obtener una imagen completa y comprensiva de la HC. Además, el embolsado, aunque no se consideró una actividad energéticamente intensiva como el tostado, presentó una HC de 0.0862 kg de CO_{2e} kg⁻¹ de café verde, lo que podría indicar la necesidad de revisar los materiales utilizados o buscar opciones más sostenibles.

Conclusiones

La huella de carbono emerge como una métrica esencial para evaluar el impacto ambiental de la producción de alimentos. En este caso, la cadena productiva del café orgánico bajo sombra cultivado por la cooperativa Comon Yaj Noptic SPR de RL presentó una emisión significativa en sus diferentes etapas, alcanzando un total de 1.034 kg de CO_{2e} kg⁻¹ de café verde producido.

A pesar de las emisiones asociadas a la producción de café, el sistema agroforestal implementado las compensa de manera notable, capturando en promedio 20.486 kg CO_{2e}. Esto se traduce en una huella de carbono neta de -19.452 kg CO_{2e} kg⁻¹ de café verde, una cifra que evidencia la capacidad del sistema agroforestal de revertir su huella de carbono.

Estos hallazgos refuerzan la idea de que estos sistemas agroforestales no solo son sostenibles desde una perspectiva medioambiental, sino que son altamente efectivos para la mitigación del cambio climático, al capturar más CO₂ del que emiten. En ese sentido, es esencial promover y apoyar a los pequeños productores en la adopción y mantenimiento de prácticas agroforestales, dada su eficacia comprobada en la reducción del impacto ambiental y en la contribución a un futuro más sostenible.

Agradecimiento

A la cooperativa Comon Yaj Noptic SPR de RL, con sede en La Concordia, Chiapas, por su invaluable colaboración en este estudio. Extendemos un especial agradecimiento a todos y todas sus integrantes por su hospitalidad y generosidad, pero sobre todo por el trabajo que realizan día a día, demostrando que es posible producir de manera responsable y sostenible. Gracias por ser parte integral de esta investigación.

Literatura citada

- Albornoz O. A. C. 2017. Huella de carbono del café (*Coffea arabica*) en Empresa Asociativa Campesina Aruco en Copán, Honduras para el año 2016-2017. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Honduras. 40 p.
- Casanova-Lugo, F., L. Ramírez-Avilés, D. Parsons, A. Caamal-Maldonado, A. T. Piñeiro-Vázquez, V. Díaz-Echeverría. 2016. Environmental services from tropical agroforestry systems. Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente 22:269-284.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.06.029>
- Convención Marco para el cambio climático (CMCC).1994. Disponible en:
<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>

- Escamilla, E. 2007. Influencia de los factores ambientales, genéticos, agronómicos y sociales en la calidad del café orgánico en México. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados-M.F. Altamirano, Veracruz. 254 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2017. Adoption of climate technologies in the agrifood sector. FAO Investment centre Roma. FAO/EBRD Cooperation. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i7022e/i7022e.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2019. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Task Force on National Greenhouse Gas Inventories (TFI). 49th session of the IPCC, 8 – 12 May 2019, Kyoto, Japan. Disponible en línea en: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- Pandey, D., M. Agrawal and J. S. Pandey. 2011. Carbon footprint: current methods of estimation. *Environ Monit Assess* 178:135–160. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1678-y>
- Porras, I., A. Amrein y B. Vorley. 2015. Café y créditos de carbono para productores de pequeña escala: ¿Las finanzas de carbono pueden promover la producción más limpia de café en Nicaragua? International Institute for Environment and Development. <http://www.jstor.org/stable/resrep02679>
- R Core Team (2023). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Schneider, H. y J. Samaniego. 2010. La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios. LC/W.298. Copyright © Naciones Unidas. Todos los derechos reservados. Impreso en Naciones Unidas, Santiago de Chile. 46 p.
- Segura, M. A., y H. J. Andrade. Huella de carbono en cadenas productivas de café (*Coffea Arabica* L.) con diferentes estándares de certificación en Costa Rica. *Luna Azul* 35: 60-77. Disponible en línea en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-24742012000200005&script=sci_abstract&tlng=es
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Fecha de Consulta 20 de septiembre de 2023. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=chis>
- Villarreyna, R., J. Avelino y R. Cerda. 2020. Adaptación basada en ecosistemas: efecto de los árboles de sombra sobre servicios ecosistémicos en cafetales. *Agronomía Mesoamericana* 31:499–516. <https://doi.org/10.15517/am.v31i2.37591>