EVALUACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LA CADENA PRODUCTIVA DE CAFÉ: ESTUDIO DE CASO DE LA FINCA TRIUNFO VERDE, CHIAPAS, MÉXICO †

[EVALUATION OF THE CARBON FOOTPRINT OF THE COFFEE PRODUCTION CHAIN: CASE STUDY OF THE FINCA TRIUNFO VERDE, CHIAPAS, MÉXICO]

Adán Villa-Herrera[1], **Martín A. Bolaños-González**[1*], **Fernando Paz-Pellat**[2], **José M. Salvador-Castillo**[1], **Luz M. Ramírez-Armas**[1] **and Carolina Villagómez Jiménez**[3]

[1]*Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Carr. México-Texcoco km 36.5, Montecillo C.P. 56264. Texcoco, Estado de México, México. Email: adan123avh@hotmail.com, slcastillo990@gmail.com, luz.ramirezarmas@gmail.com, martinb72@gmail.com **
[2]*Programa Mexicano del Carbono, Morelos N° 17, San Simón C.P. 56210, Texcoco, Estado de México, México. Email: ferpazpel@gmail.com*
[3]*Universidad Autónoma Chapingo, Carr. México-Texcoco km 38.5, Chapingo C.P. 56230. Texcoco, Estado de México, México. Email: carolinavillagomez82@gmail.com*
**Corresponding author*

SUMMARY

Background. The carbon footprint (CF) quantifies the total greenhouse gas (GHG) emissions generated by human activities. Reducing the CF of agricultural products is essential for mitigating global warming. **Objective**. To quantify the CF in organic shade-grown coffee production in two modalities: green coffee for export and ground, packaged coffee for the local market at Finca Triunfo Verde S.C., Chiapas, Mexico. **Methodology**. During the 2023–2024 production cycle, 458 plots across 32 communities in eight municipalities of the Sierra Madre de Chiapas were evaluated. GHG emissions were estimated according to IPCC guidelines and the PAS-2050 standard. **Results**. The average total CF was 0.909 kg CO_2e kg^{-1} for export green coffee and 1.014 kg CO_2e kg^{-1} for locally marketed coffee. The wet processing phase had the highest impact in both cases, primarily due to methane emissions from pulp decomposition (0.289 kg CO_2e kg^{-1}) and nitrous oxide emissions from wastewater (0.266 kg CO_2e kg^{-1}). Transportation contributed 0.238 kg CO_2e kg^{-1} for export coffee and 0.211 kg CO_2e kg^{-1} for local market coffee due to fuel consumption. Together, these activities accounted for 87.18% and 75.54% of the total CF for export and local market coffee, respectively. **Implications**. Optimizing coffee by-product management, adopting clean energy, and improving transportation efficiency could significantly reduce CF. **Conclusion**. Wet processing was the most significant impactful phase in both production modalities. Pulp decomposition contributed 31.77% to the CF of export coffee and 28.48% to local market coffee. Wastewater emissions represented 29.28% and 26.25%, respectively, while transportation represented 26.13% and 20.81% of the CF for export and local market coffee.
Key words: *Coffea arabica;* agroforestry systems; greenhouse gases; sustainable production.

RESUMEN

Antecedentes. La huella de carbono (HC) mide las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por actividades humanas. Reducir la HC de los productos agrícolas es esencial para mitigar el calentamiento global. **Objetivo.** Cuantificar la HC en la producción de café orgánico bajo sombra en dos modalidades: para exportación (café verde) y mercado local (café molido y empaquetado) en la Finca Triunfo Verde S.C., Chiapas, México. **Metodología**. Durante el ciclo productivo 2023-2024 se evaluaron 458 parcelas, ubicadas en 32 localidades de ocho municipios de la Sierra Madre de Chiapas. Las emisiones de GEI se estimaron conforme a las directrices del IPCC y la norma PAS-2050. **Resultados.** La HC promedio total fue de 0.909 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde para exportación y 1.014 kg de CO_2e kg^{-1} para mercado local. La fase de beneficio húmedo mostró mayor impacto en ambas modalidades, debido a las emisiones de metano por la descomposición de la pulpa (0.289 kg CO_2e kg^{-1}) y a las

† *Submitted November 27, 2024 – Accepted February 12, 2025.* http://doi.org/10.56369/tsaes.6043

Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
ISSN: 1870-0462.
ORCID = A. Villa-Herrera: https://orcid.org/0009-0009-3368-2582; **M.A. Bolaños-González**: https://orcid.org/0000-0002-8110-1051; **F. Paz-Pellat**: https://orcid.org/0000-0002-6697-2238; **J.M. Salvador-Castillo**: https://orcid.org/0000-0002-8814-9891; **L.M. Ramírez-Armas**: https://orcid.org/0009-0004-5443-4864; **C. Villagómez-Jiménez**: https://orcid.org/0009-0006-7822-6175

emisiones de óxido nitroso de las aguas residuales (0.266 kg de CO_2e kg^{-1}). Las emisiones por transporte fueron de 0.238 kg de CO_2e kg^{-1} para exportación y 0.211 kg de CO_2e kg^{-1} para mercado local debido al consumo de combustible. Estas actividades, en conjunto, representaron el 87.18 y 75.54% de la HC total en café de exportación y mercado local, respectivamente. **Implicaciones.** Optimizar el manejo de subproductos del beneficio del café, emplear energías limpias y mejorar la eficiencia del transporte pueden reducir significativamente la HC. **Conclusión**. El beneficio húmedo tuvo el mayor impacto en ambas modalidades. La descomposición de pulpa contribuyó con un 31.77% a la HC del café de exportación y 28.48% en café para mercado local. Las emisiones de aguas residuales representaron un 29.28% y 26.25%, respectivamente, mientras que el transporte aportó un 26.13% y 20.81% de la HC para el café de exportación y para mercado local.
Palabras clave: *Coffea arabica;* sistemas agroforestales; gases de efecto invernadero; producción sostenible.

INTRODUCCIÓN

El sexto informe del IPCC (IPCC, 2022) señala que el sector agropecuario es la tercera fuente de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel global. Las emisiones derivadas de la producción de alimentos están estrechamente relacionadas con el crecimiento poblacional, ya que a medida que esta aumenta, la producción de alimentos debe incrementarse para satisfacer la demanda básica de consumo (Jaisawal y Agrawal, 2019). Según Crippa *et al*. (2021), el sistema alimentario es responsable de aproximadamente la tercera parte de las emisiones globales de GEI, considerando toda la cadena de suministro.

La agricultura es una fuente sustancial de dióxido de carbono (CO_2) debido al cambio de uso del suelo y al uso de combustibles fósiles y electricidad en diversas actividades. Además, genera metano (CH_4) a través de la fermentación entérica en la ganadería y la descomposición anaeróbica de la materia orgánica, así como óxido nitroso (N_2O), principalmente, por la aplicación de fertilizantes nitrogenados y el manejo de estiércol (Pathak, 2013; Rees *et al*., 2014). Las emisiones de N_2O tienen un impacto significativo debido a que su potencial de calentamiento global es 298 veces mayor que el CO_2 (Skiba y Rees, 2014).

La cantidad y tipo de GEI emitidos en la agricultura varían según el cultivo y las prácticas de manejo, lo que resalta la importancia de evaluarlos detalladamente para identificar medidas de mitigación efectivas. La huella de carbono (HC) es un indicador clave para estimar las emisiones de GEI (Schneider y Samaniego, 2010). Su cálculo permite establecer un balance de carbono, considerando tanto las emisiones como el potencial de remoción (Guerra, 2007). Lo que puede facilitar la creación de estrategias de reducción de emisiones en función de dicho balance.

No obstante, diversos estudios subrayan la importancia de una definición precisa de la HC para que su estimación sea coherente y útil en la evaluación de emisiones, así como en la toma de decisiones orientadas a su reducción (Wright *et al*., 2011). Enríquez *et al*. (2020), señalan que el propósito de la HC es identificar puntos críticos de emisión, optimizar procesos productivos, ajustar insumos y mejorar prácticas en transporte, distribución y almacenamiento de productos. Este indicador tiene gran importancia al evaluar el desempeño ambiental en sistemas agrícolas para identificar los procesos con mayor oportunidad de mejora (Liu *et al*., 2022).

La producción de café es de gran relevancia económica y ambiental a nivel global (Aguilar, 2012). México es el décimo mayor productor a nivel mundial (OIC, 2021), con el estado de Chiapas como líder nacional, abarcando una superficie cultivada de 243 954.77 ha (SIACON-SAGARPA, 2024). En particular, la región Frailesca en la Sierra Madre de Chiapas, con sus condiciones agroclimáticas favorables para el café, permiten su cultivo bajo sistemas agroforestales, que funcionan como sumideros de GEI al capturar CO_2 (van Rikxoort *et al*., 2014; Soto y Aguirre, 2015). Estos sistemas agroforestales tienen un alto valor para el medio ambiente, ya que, al integrar árboles y vegetación múltiple al cafetal, compensan las emisiones de GEI reduciendo la HC (Lara *et al.*, 2024). Sin embargo, aunque estos sistemas tienen un gran valor productivo y ambiental, existen pocos estudios enfocados en evaluar su HC.

El objetivo de este estudio fue evaluar la HC de la cadena productiva del café bajo sombra en una organización de pequeños productores de café orgánico, abarcando desde la producción a nivel de parcela hasta su comercialización en dos modalidades: la exportación de café verde y la venta local de café molido. Además, se identificaron las fases y actividades con las mayores emisiones de GEI y se propusieron estrategias de optimización para reducir la HC en el sistema de producción de café orgánico bajo sombra. Evaluar la HC del café destinado a la exportación y al mercado local es fundamental por diversas razones. En primer lugar, la exportación de café implica el transporte a largas distancias, lo que puede generar emisiones significativas de GEI. Por otro lado, el café para el mercado local, aunque no requiere transporte de larga distancia, involucra actividades adicionales como el molido y el empaquetado, que también contribuyen al incremento

de la HC. Conocer estas diferencias permite identificar oportunidades de mejora en cada modalidad, optimizar el uso de recursos y disminuir las emisiones de GEI. En un contexto global, donde los consumidores y los mercados internacionales exigen productos sostenibles, cuantificar la HC del café no solo refuerza la competitividad de los productores en el mercado internacional, sino que también fomenta prácticas más amigables con el medio ambiente a nivel local.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La organización de pequeños productores de café de la Finca Triunfo Verde (FTV) se integra de 365 socios que cultivan café orgánico bajo sombra, distribuidos en 32 comunidades de los municipios Ángel Albino Corzo, La Concordia, Monte Cristo de Guerrero, Villa Corzo, Capitán Luis A. Vidal, Honduras de la Sierra, Siltepec y Chicomuselo, del estado de Chiapas, México (Figura 1).

Los climas predominantes en la región de estudio son templado húmedo en las zonas de mayor altitud de la Sierra Madre, templado subhúmedo en las áreas intermedias, y semicálido a cálido subhúmedo en las planicies. Las lluvias se concentran en verano, desde finales de mayo hasta principios de octubre (Salinas, 2009; INEGI, 2010). La temperatura media anual oscila entre 14 y 26º C, mientras que la precipitación media anual varía entre 1,100 y 4,000 mm.

El área de estudio se caracteriza por tres tipos de relieve: crestas alargadas por arriba de los 2,000 msnm, un macizo montañoso con pendientes fuertes a escarpadas entre 1,000 y 2,000 msnm, y laderas con pendientes moderadas a fuertes por debajo de los 1,000 msnm. Los suelos predominantes son litosol, acrisol, luvisol, fluvisol, cambisol y leptosol (SEMARNAP, 1998).

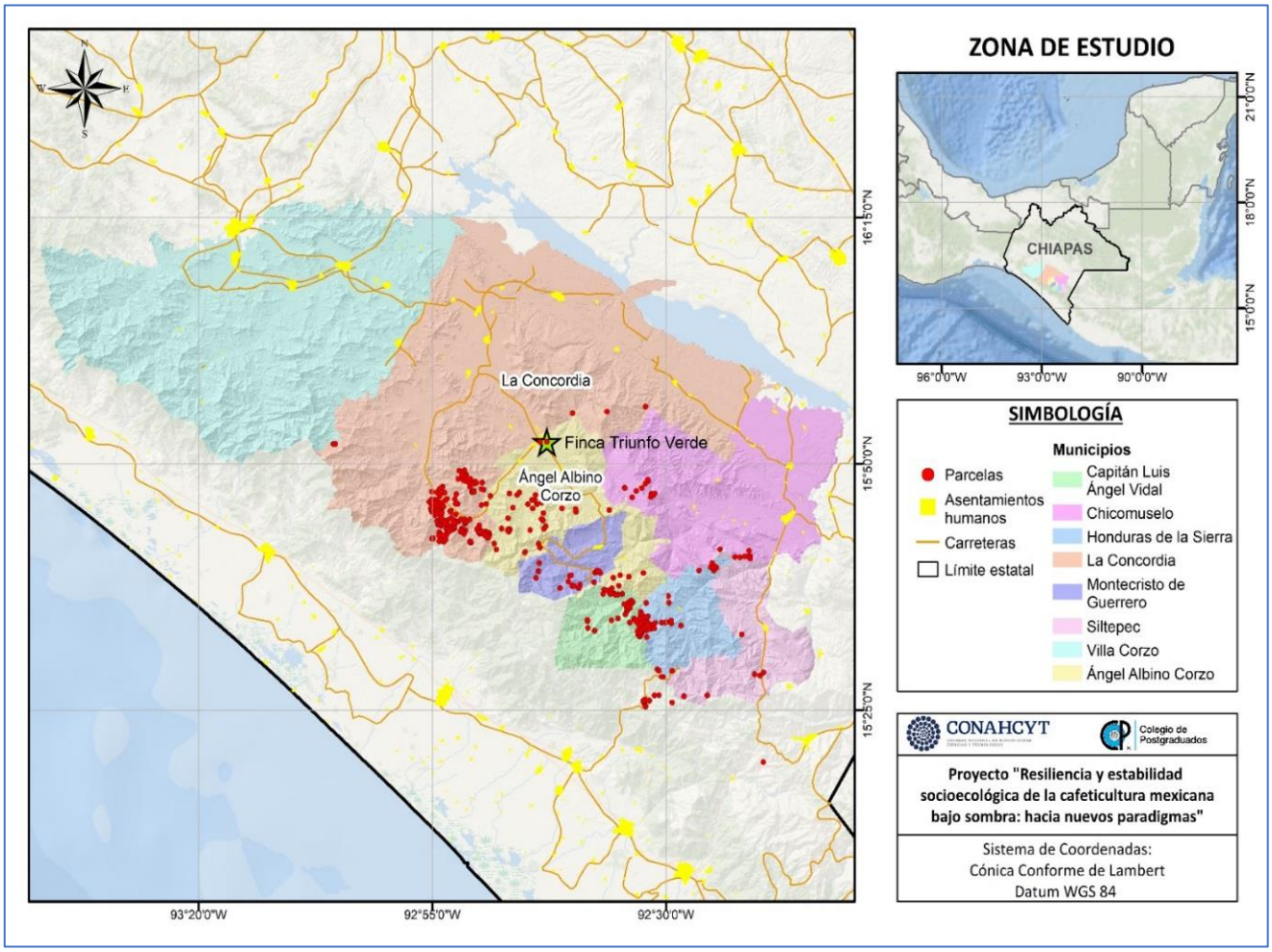

Figura 1. Zona de estudio: municipios, comunidades y distribución de parcelas que integran la Finca Triunfo Verde S.C. Fuente: elaboración propia.

Información recopilada

La recolección de datos de las unidades de producción se realizó entre julio y octubre de 2023. Durante la temporada de cosecha (11 al 25 de febrero de 2024), se registraron las fases y actividades del proceso de producción. La información fue obtenida mediante entrevistas a productores socios de la FTV y a técnicos involucrados en el proceso de transformación del café. Además, se realizaron visitas a diversas comunidades para complementar los datos y documentar los procesos productivos. La información también incluyó fichas técnicas de 458 parcelas gestionadas por 365 productores, que detallan las prácticas de manejo específicas para cada una.

En la etapa de beneficio húmedo, se registró el tiempo de operación de los motores eléctricos y de gasolina para calcular el consumo de energía y combustible. Además, se realizaron aforos para medir la cantidad de agua utilizada y se tomaron muestras de agua, antes y después del proceso de despulpado, para analizar la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la concentración de nitrógeno total.

Las muestras de aguas fueron analizadas en el Laboratorio de Ciencias Ambientales del Colegio de Postgraduados. La DBO se determinó utilizando el método Winkler modificado con la adición de ácido de sodio, de acuerdo con las recomendaciones de APHA, AWWA y WEF (2005). La concentración de nitrógeno total se determinó por el método de Kjeldahl, que es el estándar para muestras de aguas residuales (Trikilidou *et al*., 2020).

Estimación de HC por fases del proceso de producción de café

La estimación de las emisiones de GEI se realizó conforme al protocolo basado en las directrices del IPCC (2006, 2019) y la norma británica PAS-2050 (2008 y 2011). El estudio abarcó desde el manejo de la parcela hasta la comercialización, identificando y cuantificando tanto las emisiones directas como indirectas asociadas a cada fase.

Para cada actividad, las emisiones de GEI se calcularon al multiplicar factores de emisión (FE) específicos por los datos de actividad medidos (DA), y se convirtieron a dióxido de carbono equivalente (CO_2e) utilizando el potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) según la Ecuación (1), en línea con las directrices del IPCC para los inventarios nacionales de GEI (IPCC 2006 y 2019). Los valores para el GWP en un horizonte de 100 años son: 1 para el CO_2, 28 para el CH_4 y 298 para el N_2O, que son los que se utilizaron en este estudio.

$$\text{Emisiones de GEI } (CO_2e) = DA \times FE \times GWP \quad (1)$$

Datos de actividad (DA)

Los DA representan la cantidad de actividad que genera las emisiones, como el consumo de energía, la aplicación de fertilizantes, el uso de productos industriales y el consumo de gasolina para el transporte. Estos datos se expresan en unidades que dependen de la actividad, por ejemplo, litros de combustible consumido, kilómetros recorridos, kilogramos de producto aplicado o litros de aguas residuales derivadas del beneficio húmedo.

Las actividades emisoras de GEI se agruparon por fases del proceso productivo (Figura 2). La primera fase va desde el manejo de la parcela hasta la cosecha del café cereza. La segunda fase cubre las actividades del beneficio húmedo, hasta la obtención del café pergamino. La tercera fase comprende el acopio del café pergamino, su trillado y el proceso del café molido destinado a la venta en la cooperativa (tostado, molido y empaquetado). En el caso del café para exportación, esta fase contempla el acopio, trillado y transporte al puerto de Veracruz.

Para estandarizar los datos a la unidad funcional de café empleada en este trabajo (kg de café verde) en las diferentes actividades, se utilizaron factores de conversión para un quintal de café pergamino (57.5 kg de café pergamino) que equivale a 270 kg de café cereza. Después del secado y trillado, un quintal equivale a 46 kg de café verde u oro.

Las actividades que generan emisiones de GEI, junto con sus unidades de medida, se muestran en la Tabla 1.

Factores de emisión (FE)

Los FE son coeficientes que establecen la relacionan entre la cantidad de un GEI liberado a la atmósfera con las actividades que los generan (IPCC, 2006). Estos factores se expresan en términos de unidades de masa de GEI (CO_2, CH_4, o N_2O). La unidad de referencia puede ser el peso, volumen, distancia o la duración de una actividad (Aguilar, 2012). Los FE utilizados en este estudio se muestran en la Tabla 2.

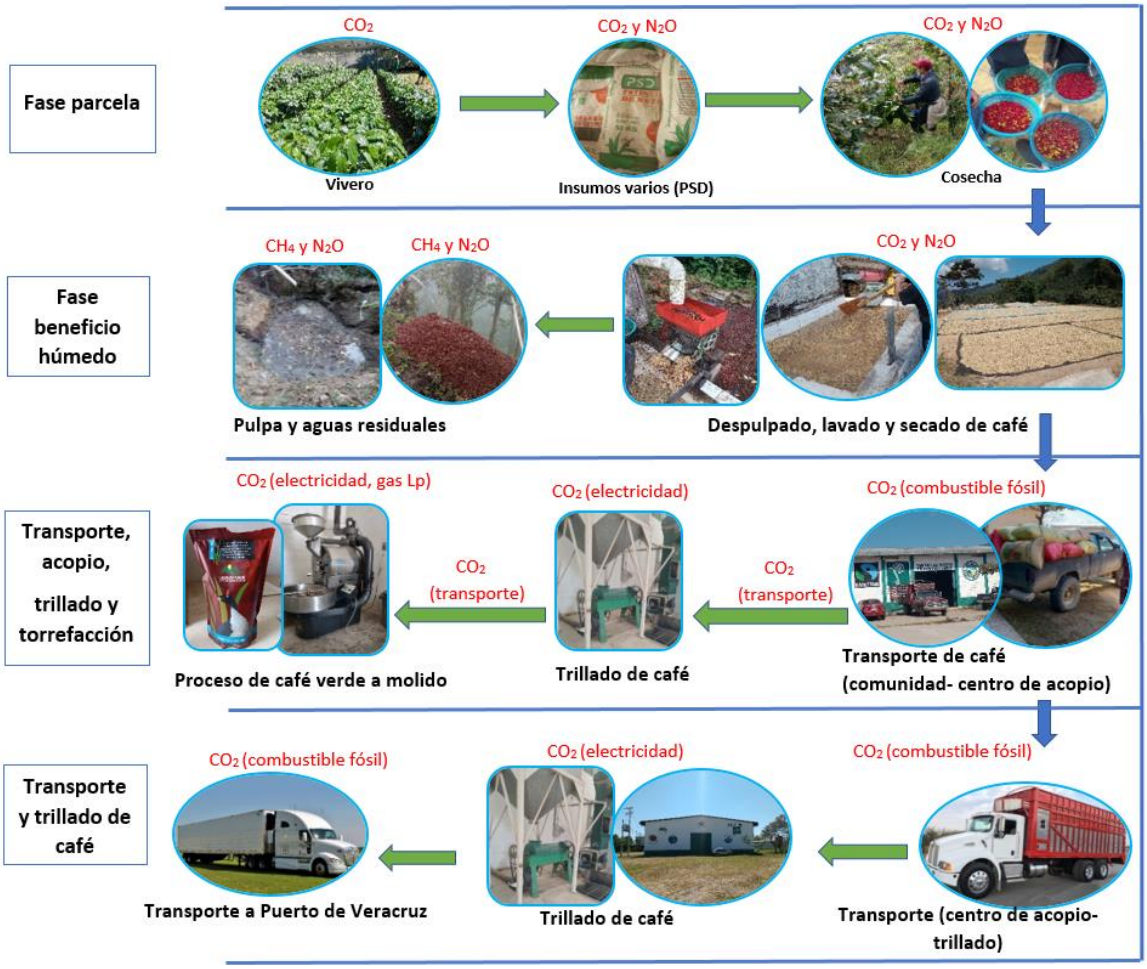

Figura 2. Diagrama de las actividades que emiten GEI por fases de la cadena productiva. PSD (Fertilizante orgánico: Potencializador Solubilizador Dihidro), CO_2: Dióxido de Carbono, CH_4: Metano, N_2O: Óxido Nitroso). Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Actividades consideradas en el análisis de la huella de carbono.

Actividades/fuentes de emisiones de GEI en la producción de café	Unidad de medida
Fase parcela	
Bolsa para planta en vivero	kg
Transporte de insumos	L
Aplicación de PSD**	kg
Fase beneficio húmedo	
Aguas residuales óxido nitroso (N_2O)	L
Aguas residuales metano (CH_4)	L
Descomposición de la pulpa	kg
Gasolina y electricidad para despulpado	L (gasolina), kWh (energía eléctrica)
Fase de acopio y torrefacción	
Transporte de pergamino a FTV, centro de acopio-trillado-torrefacción)	L
Electricidad en instalaciones de FTV. (torrefacción y luz de oficinas)	kWh
Bolsas de envasado de café	kg
Gas LP (tostado)	L
Fase de trillado y transporte (embarque)	
Transporte a centro de trillado y puerto de Veracruz	L (Diésel)
Bolsas de polipropileno	kg
Trillado de café	kWh

**PSD (Fertilizante orgánico: Potencializador Solubilizador Dihidro), CO_2: Dióxido de Carbono, CH_4: Metano, N_2O: Óxido Nitroso). Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Factores de emisión (FE) empleados para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero.

Fuente de emisión	FE	Unidades	Fuente
Combustibles fósiles			
Gasolina	2.33	kg CO_2e L^{-1}	IPCC-2006
Diésel	2.83	kg CO_2e L^{-1}	IPCC-2006
Gas LP	0.604	kg CO_2e kg^{-1}	Factor CO_2 y Netherlands Development Organization [SNV], 2015
Fertilizante orgánico nitrogenado			
Carbono	3.67	kg CO_2e kg^{-1} de C	(IPCC, 2006)
Carbonato de calcio	0.12	kg C kg^{-1} de $CaCO_3$	(IPCC, 2006)
Carbonato de Magnesio	0.122	kg C kg^{-1} de $MgCO_3$	(IPCC, 2006)
Nitrógeno	0.10	kg N_2O kg^{-1} N	(IPCC, 2006)
Consumibles (kg CO_2e por kg de producto)			
Plástico	2.1	kg CO_2e kg^{-1}	Factor CO_2 y Netherlands Development Organization [SNV], 2015
Bolsas de Polipropileno	3.53	kg CO_2e kg^{-1}	IPCC 2007 GWP
Costales de Yute	0.583		IPCC 2007 GWP
Electricidad			
Programa GEI México	0.3	kg CO_2e kWh^{-1}	Climate Transparency, 2022
Aguas residuales			
DBO	0.000153	kg L^{-1}	Medido
CH_4	0.03	kg CO_2e kg^{-1} de CH_4	Pramulya *et al*., 2019
GWP de CH_4	28		IPCC, 2006
Nitrógeno total (N_{total})	0.0000711	kg L^{-1}	Medido
N_2O	0.251	kg CO_2e kg^{-1} de N_2O	Pramulya *et al*., 2019
GWP de N_2O	298.00		IPCC, 2006
Residuos orgánicos			
GEI Pulpa	0.12	kg CO_2e kg^{-1}	Balma 2018

Fuente: elaboración propia

Emisiones por aplicación de fertilizantes

Para estimar las emisiones por la aplicación de Potencializador Solubilizador Dihidro (PSD) en las plantaciones de café, se consideraron las emisiones directas tras su aplicación, utilizando los FE mostrados en la Tabla 2.

Emisiones por aguas residuales

Las emisiones de CH_4 y N_2O de aguas residuales se estimaron con las Ecuaciones (2) y (3), respectivamente.

Para N_2O: $CO_2e = (Va * N_{total}) * GWP\ de\ N_2O * FE\ de\ N_2O$ (2)

Para CH_4: $CO_2e = (Va * DBO) * GWP\ de\ CH_4 * FE\ de\ CH_4$ (3)

El volumen de agua (Va) empleado fue de 50 L para la producción de un kg de café verde (equivalente a 40 L para producir un kg de café pergamino). Estos volúmenes de agua se multiplicaron por la concentración de nitrógeno total (N_{total}) o la DBO, y el GWP del gas correspondiente (ver Tabla 2).

Emisiones por descomposición de la pulpa

Las emisiones de GEI por descomposición de la pulpa se calcularon con la Ecuación (4).

$CO_2e = PF * FE\ por\ descomposición\ de\ pulpa$ (4)

Los DA correspondieron a la cantidad de pulpa fresca producida (PF), medida en kg, y el FE por descomposición de la pulpa tomado de Balma (2018).

Emisiones por consumo de combustibles fósiles

Las emisiones de GEI generadas por el uso de combustibles fósiles están ligadas a las actividades de manejo del cultivo, incluyendo el transporte de insumos y plántulas, así como el uso de motores a gasolina en el proceso de despulpado y el uso de gas Lp para el tostado de café. Las estimaciones se realizaron tomando en cuenta el consumo total de combustible, basado en las directrices del IPCC (2006).

Transporte del café pergamino

Los cálculos de emisiones por transporte se estimaron con información del consumo de combustible usado

por viaje, número de viajes y cantidad de producto transportado. Se consideró la distancia que existen de las parcelas al centro de acopio en la comunidad de Jaltenango de la Paz y la cantidad de café pergamino comprometido para su entrega a la cooperativa, estimando las emisiones para cada productor y, posteriormente, se obtuvo un promedio.

También se incluyeron las emisiones por el transporte del café para su trillado, que se realiza en la comunidad de Independencia, municipio de La Concordia. Para esta actividad se utiliza un camión tipo Torton, con capacidad de 16 Mg de café pergamino de carga promedio, un recorrido de 37 km y un rendimiento de motor de 2.5 km L^{-1}. De igual manera, se consideró el transporte de café verde destinado para el proceso a café molido.

Para estimar las emisiones asociadas al transporte hacia el puerto de Veracruz, se consideró un rendimiento del motor de 1.8919 km L^{-1} y un consumo total de 370 L de diésel para un trayecto de 700 km. La carga transportada por cada viaje del tráiler fue de 28 Mg, equivalente a 400 sacos de café verde de 70 kg, más 1 kg por cada costal de yute.

Emisiones por consumo de energía eléctrica

El análisis del consumo de energía eléctrica se basó en cada etapa del proceso de producción de café, con pruebas de funcionamiento realizadas durante la etapa de despulpado. Además, se recopilaron datos de consumo eléctrico de dos instalaciones clave, donde se realiza la torrefacción y las oficinas administrativas, aplicando un FE de 0.3 kg de CO_2 por kWh, conforme al Reporte de Transparencia Climática de 2022 para México (Climate Transparency, 2022).

Procesamiento de la información para estimar la HC

La información recopilada fue procesada utilizando el *software* Microsoft Excel®. La HC total se estimó como la suma de las emisiones generadas en cada fase de la cadena productiva del café destinado a la exportación o para mercado local. Además, se calcularon estadísticas descriptivas.

El análisis de incertidumbre se realizó mediante simulaciones Monte Carlo con 10 000 iteraciones, siguiendo un enfoque estandarizado para evaluar cómo la variabilidad de las entradas afecta el resultado final. Para ello, se utilizó Python, en particular, las bibliotecas NumPy y Pandas, y Matplotlib para elaborar las gráficas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Emisiones en el proceso de producción de café

El análisis de la HC (Tabla 3) reveló que la producción de café para exportación genera en promedio 0.909 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde, cifra que aumenta a 1.014 kg CO_2e kg^{-1} en el café procesado y empaquetado para mercado local.

En relación con la HC total, Aguilar (2012) reportó que, en cafetales bajo sombra de la misma región de Chiapas en donde se realizó el presente estudio, la producción de café convencional generó 0.33 kg de CO_2e, mientras que la producción orgánica alcanzó 0.11 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde. La diferencia entre ambos sistemas de producción se atribuyó al uso de fertilizantes nitrogenados en la producción convencional. Las emisiones reportadas por Aguilar (2012) son menores a las obtenidas en este estudio, lo que se atribuye a que no consideró las emisiones de GEI generadas por la descomposición de la materia orgánica de la pulpa y las aguas mieles.

De manera similar, Trinh *et al*. (2020) reportaron una HC comparable a la obtenida en este estudio al evaluar el ciclo de vida del cultivo de café robusta producido de forma orgánica y convencional en Vietnam, utilizando como unidad funcional 1 kg de café verde. Sus resultados mostraron que el sistema intensivo convencional tuvo el mayor impacto, con 0.935 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde, seguido del sistema convencional moderado con 0.729 kg de CO_2e y el intensivo orgánico con 0.644 kg de CO_2e. Las diferencias en la HC se debieron al uso de fertilizantes nitrogenados en los sistemas convencionales. Por su parte, Ortiz *et al*. (2017) reportaron una HC de 1.08 kg de CO_2e, aunque utilizaron como unidad funcional un kg de café cereza, en un sistema de producción en Kenia.

Por el contrario, Arias *et al.* (2018) reportaron emisiones superiores a las del presente estudio, de 2.17 kg de CO_2e kg^{-1} de café pergamino, siendo la fertilización nitrogenada, el transporte y el consumo de combustibles fósiles las actividades con mayores emisiones de GEI. Asimismo, Hernández *et al*. (2018) determinaron una HC de 2.17 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde en Colombia. Por su parte, Alborroz (2017) calculó una HC de 3.42 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde en un sistema de café convencional en Honduras. Las emisiones relacionadas con el uso de fertilizantes, diésel y metano generado por aguas mieles en las lagunas de oxidación tuvieron el mayor impacto, con 1.74 kg de CO_2e kg^{-1} café verde.

Asimismo, Van Rikxoort *et al.* (2014) reportaron que, en el policultivo tradicional y comercial, las emisiones

oscilaron entre 6.2 a 7.3 kg de CO_2e kg^{-1} de café pergamino. En contraste, para sistemas de monocultivo bajo sombra y sin sombra, las emisiones variaron entre 9.0 a 10.8 kg de CO_2e kg^{-1} de café pergamino. Finalmente, Nab y Maslin (2020) reportaron una HC de 14.61 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde en un sistema de producción convencional, mientras que para la producción sostenible fue de 3.51 kg de CO_2e kg^{-1}, ambas cifras superiores a lo estimado en este estudio. Las HC reportadas en los estudios de Nab y Maslin (2020) y Van Rikxoort *et al*. (2014) son significativamente mayores a las reportadas en este trabajo, lo que podría explicarse por el uso de fertilizantes y pesticidas en la fase de cultivo, el uso de combustibles fósiles en la fase de beneficio y, en gran medida, al uso de aviones de carga para el transporte del café de exportación.

Los intervalos de confianza (IC) al 95% fueron calculados mediante simulaciones Monte Carlo. En el caso de algunas actividades, como la aplicación de PSD (fertilizante) y el transporte al centro de acopio, los límites inferiores del IC resultaron negativos debido a la alta variabilidad de los datos y la incertidumbre asociada. Dado que las emisiones de GEI no pueden ser negativas, se estableció un límite inferior de 0 para reflejar una estimación realista.

El análisis de incertidumbre reveló que algunas actividades presentan una amplia dispersión en las emisiones estimadas, lo que sugiere un comportamiento menos predecible y más sensible a las condiciones operativas. En particular, destacan el transporte al centro de acopio, la descomposición de pulpa y las emisiones de N_2O y CH_4 de las aguas residuales.

En la Figura 3, se muestran las emisiones de todas las fases desglosadas por actividades para la cadena productiva del café destinado a la venta local. De igual forma, en la Figura 4 se ilustran las emisiones de la cadena de producción del café para exportación. Las mayores emisiones se registraron en la fase de beneficio húmedo para ambas modalidades de comercialización, con 0.590 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde.

Emisiones en la fase de beneficio húmedo

En la fase de beneficio húmedo, la descomposición de pulpa constituyó la principal fuente de emisiones, con 0.289 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde en forma de metano (CH_4), seguido de las emisiones de N_2O provenientes de las aguas residuales, con 0.266 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde para ambos tipos de comercialización (Figura 4).

Tabla 3 Estadísticas descriptivas de actividades e insumos de emisiones de GEI en el proceso de producción de café.

Actividad	NP	Mínimo	Media	Máximo	Mediana	DS	Intervalo de Confianza (95%)
Fase parcela							
Bolsa de plástico (vivero)	100	0	0.012	0.303	0	0.031	0.000 - 0.081
Transporte de insumos	115	0	0.048	0.992	0	0.108	0.031 - 0.070
Aplicación de PSD	17	0	0.020	2.324	0	0.173	0.000 - 0.351
Fase beneficio húmedo							
Aguas residuales (N_2O)	6	0.015	0.266	0.516	0.262	0.174	0.196 - 0.325
Aguas residuales (CH_4)	6	0.005	0.006	0.008	0.007	0.001	0.004 - 0.008
Descomposición de la pulpa (CH_4)	8	0.130	0.289	0.235	0.143	0.035	0.189 - 0.378
Combustible (despulpado)	458	0.004	0.015	0.015	0.015	0.001	0.018 - 0.022
Bolsas de polipropileno	458	ND	0.013	ND	ND	ND	ND
Fase de acopio y proceso de café molido							
Transporte (comunidad-FTV)	458	0.005	0.176	3.83	0.116	0.276	0.000 - 0.670
Transporte (FTV-trillado-proceso)	ND	ND	0.035	ND	ND	ND	ND
Electricidad en instalaciones de FTV (proceso de café y luz de oficinas)	ND	ND	0.017	ND	ND	ND	ND
Bolsas de envasado de café	ND	ND	0.067	ND	ND	ND	ND
Gas LP	ND	ND	0.047	ND	ND	ND	ND
Fase de trillado y transporte (embarque)							
Transporte (comunidad-FTV)	458	0.005	0.176	3.83	0.116	0.276	0.000 - 0.670
Transporte (FTV-trillado-puerto de Veracruz)	ND	ND	0.061	ND	ND	ND	ND
Trillado de café	ND	ND	0.002	ND	ND	ND	ND

NP indica el número de parcelas en las que se realizó la actividad. DS indica desviación estándar. ND indica que no se obtuvo la información. Fuente: elaboración propia.

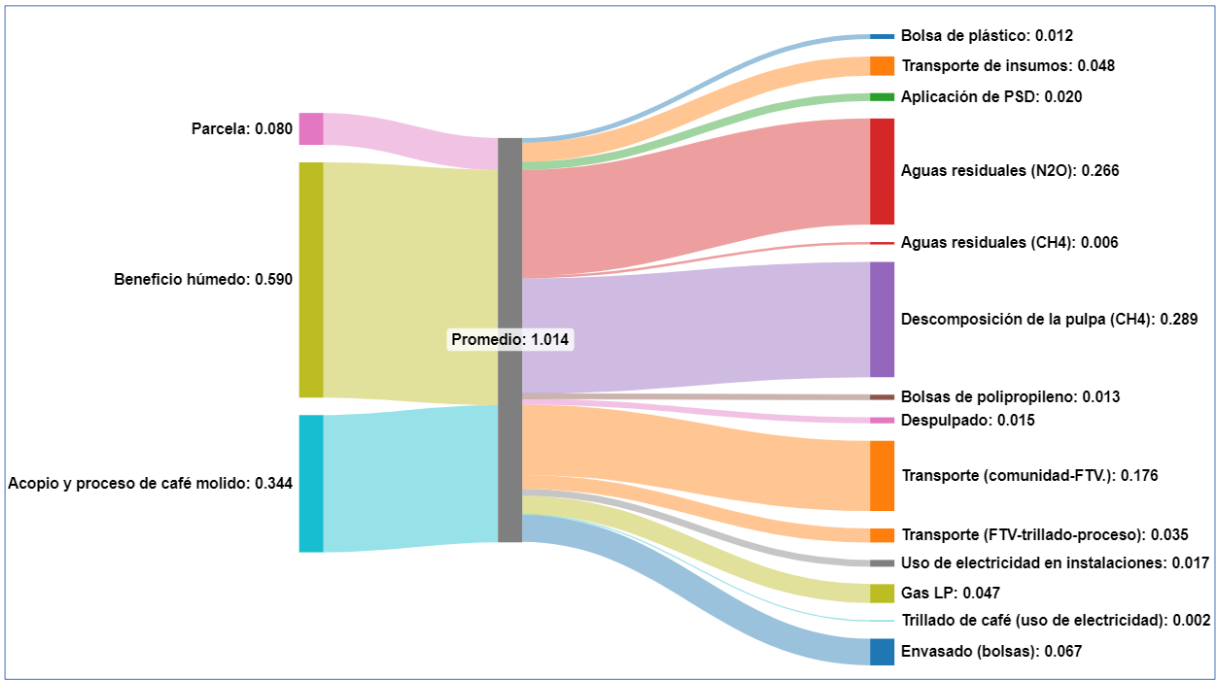

Figura 3. Huella de carbono en la cadena productiva de café para mercado local. Fuente: elaboración propia.

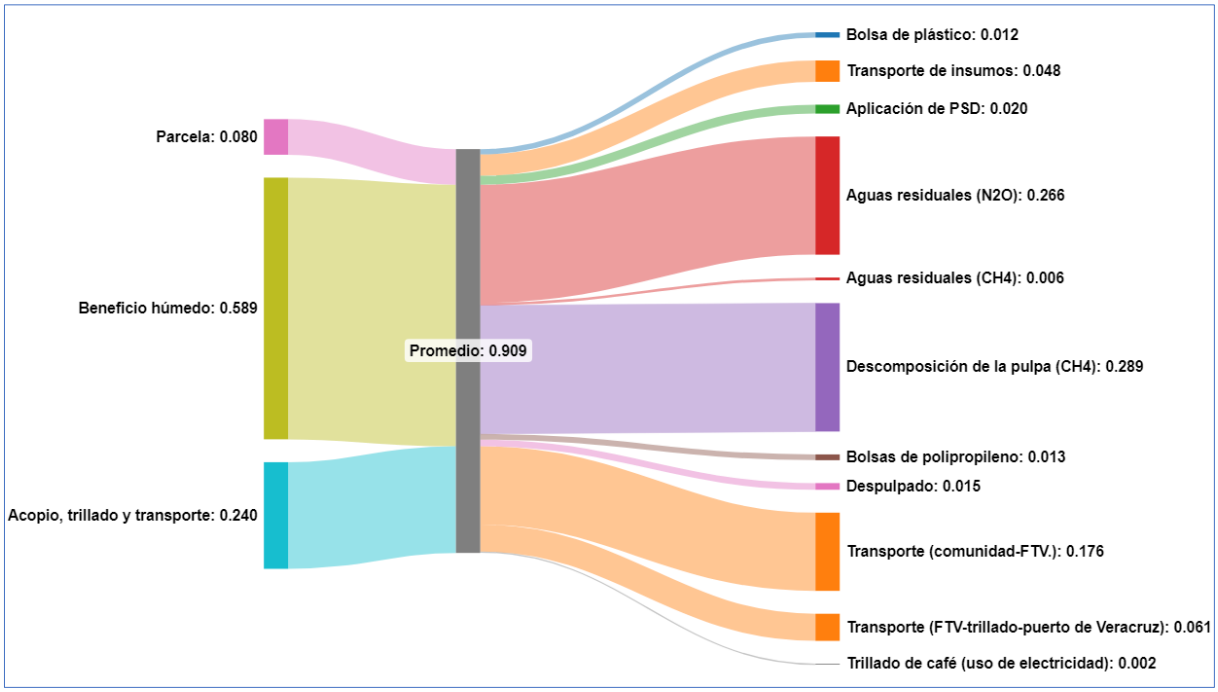

Figura 4. Huella de carbono en la cadena productiva de café para exportación. Fuente: elaboración propia.

Pramulya *et al*. (2019) reportaron mayores emisiones de CO_2e en las aguas residuales (0.125 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde) y menores emisiones por descomposición de la pulpa (0.015 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde). Las emisiones estimadas en este trabajo fueron mayores que las reportadas por Pramulya *et al*. (2019), lo que podría atribuirse a la mayor cantidad de agua usada para lavado de café en este estudio, a la DBO calculada y al manejo de pulpa.

Por su parte, van Rikxoort *et al*. (2014) informaron emisiones más elevadas para la fermentación de la materia orgánica en la pulpa y las aguas residuales, con un promedio de 4.7 kg de CO_2e kg^{-1} de café pergamino, usando 80 L de agua kg^{-1} de café pergamino producido.

Albornoz (2017), reportó 0.29 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde en aguas residuales, mientras que Fuentes (2019) informó emisiones de 0.325 kg de CO_2e kg^{-1} café verde en las aguas residuales dispuestas en lagunas anaerobias, valores ligeramente superiores a los obtenidos en el presente estudio. Estas diferencias podrían explicarse por las variaciones en los valores de DBO calculados en función de los sistemas de lavado utilizados.

Las emisiones en conjunto de N_2O de las aguas residuales y GEI por la descomposición de la pulpa fueron de 0.555 kg de CO_2e de café verde. Estos resultados superan lo reportado por Pramulya *et al*. (2019), con 0.14 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde, y por Killian (2013) con 0.374 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde.

Finalmente, las emisiones asociadas al uso de combustibles durante el despulpado, bolsas de polipropileno y al CH_4 generado por las aguas residuales fueron de 0.015, 0.013 y 0.006 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde, respectivamente, para ambas formas de comercialización del producto.

Emisiones por el transporte

Las emisiones totales de GEI por traslado de café durante toda la cadena de producción generó 0.238 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde para exportación y 0.211 kg de CO_2e kg^{-1} para consumo local. Estas cifras reflejan los impactos de diferentes fases del proceso de producción y transporte.

En la fase de acopio, el traslado del café pergamino desde las comunidades, responsabilidad de cada productor, emitió en promedio 0.176 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde. Por su parte, el transporte del café pergamino desde el centro de acopio hacia el centro de trillado y, finalmente, al puerto de Veracruz en su presentación de café verde, responsabilidad de la cooperativa, generó 0.061 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde (Tabla 3).

En comparación, Aguilar (2012), reportó solo las emisiones asociadas al traslado al puerto de Veracruz, con 0.06 kg de CO_2e para la producción convencional y 0.04 kg de CO_2e para la producción orgánica. Estos valores son muy cercanos a los estimados en este trabajo. Sin embargo, debe considerarse que estudios como los de Killian *et al*. (2013) resaltan que el transporte internacional puede aumentar significativamente la HC total, especialmente cuando se usan métodos de transporte aéreo o terrestre en lugar de marítimo.

Emisiones a nivel parcela

Las emisiones promedio a nivel parcela para ambas formas de comercialización fueron de 0.080 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde. Nab y Maslin (2020) reportaron una cifra similar para la producción de café sostenible en Vietnam (0.08 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde) y un valor menor para Brasil (0.05 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde).

Sin embargo, otros estudios reportan estimaciones más altas: Giraldi-Díaz *et al*. (2018) reportaron 0.255 kg de CO_2e kg^{-1} de café cereza; Killian *et al*. (2013), 1.02 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde; mientras que Segura y Andrade (2012) estimaron un rango de 0.5 a 1.1 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde. Por su parte, Noponen *et al*. (2012) informaron emisiones de 0.26 a 0.67 kg de CO_2e kg^{-1} de café cereza en sistemas convencionales y de 0.12 a 0.52 kg de CO_2e kg^{-1} de café cereza para producción orgánica. Las diferencias observadas se atribuyen principalmente al uso de fertilizantes nitrogenados (Arellano y Hernández, 2023; Trinh *et al*., 2020).

Las actividades consideradas como fuentes de emisión a nivel parcela incluyeron: el transporte de insumos, con un promedio de 0.048 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde, lo que representó el 25.1% del total a nivel de parcela; la aplicación de fertilizante orgánico (PSD), que generó 0.020 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde, aunque este insumo solo se utilizó en el 3.7% de las parcelas; y el uso de bolsas de plástico para plántulas, que aportó 0.012 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde, limitado a los productores que tienen su propio vivero (21.8%).

Emisiones en el proceso de café verde a molido para mercado local

Las emisiones generadas durante el proceso de transformación de café verde a molido fueron de 0.125 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde. Las principales fuentes de emisión fueron: uso de bolsas de plástico para empacado, con 0.067 kg de CO_2e; consumo de gas LP durante el tostado, que generó 0.047 kg de CO_2e; energía para el tostado, con una contribución de 0.0045 kg de CO_2e; proceso de molido, con 0.003 kg de CO_2e; uso de energía para trillado de café pergamino con una emisión de 0.0024 kg de CO_2e; sellado del producto, que aportó 0.0012 kg de CO_2e y pesado final, con una emisión mínima de 0.00024 kg de CO_2e.

En la misma fase, Killian *et al*. (2013) reportaron mayores emisiones durante el tostado y empacado, con 0.19 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde y 0.13 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde, respectivamente. Por su parte, Segura y Andrade (2012) estimaron un promedio de 0.380 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde, mayor al de este

estudio, lo que se atribuye al uso de leña como fuente de energía para el tostado. Finalmente, Giraldi-Díaz *et al*. (2018) registraron emisiones más altas para este proceso, oscilando entre 1.50 y 2.82 kg de CO_2e kg^{-1} de café molido.

CONCLUSIONES

La Huella de Carbono (HC) promedio total de la organización de pequeños productores Finca Triunfo Verde S.C. fue de 0.909 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde para el producto destinado a exportación (café verde) y 1.014 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde para el café destinado al mercado local (tostado, molido y empaquetado). Se determinó que la fase de beneficio húmedo representó el mayor impacto en ambas modalidades, con emisiones de 0.590 kg de CO_2e kg^{-1} de café verde. Conocer la HC en ambas modalidades de comercialización es fundamental para los pequeños productores de café orgánico, ya que este conocimiento les permite acceder a mercados premium, incrementar su rentabilidad y adoptar estrategias que contribuyan a mitigar el cambio climático.

Entre las principales fuentes de emisiones, la descomposición de pulpa representó la mayor contribución individual, con un 31.77% para el café destinado a exportación y 28.48% para el mercado local de la HC total. Las emisiones de óxido nitroso de las aguas residuales aportaron un 29.28% (exportación) y 26.25% (mercado local). Por su parte, el transporte de café representó el 26.13% para el café de exportación y el 20.81% para el mercado local. En conjunto, estas actividades representaron el 87.18% de la HC del café de exportación y el 75.54% de la HC del café para mercado local, lo que subraya la necesidad de priorizar la mitigación de GEI en estas fases críticas del proceso productivo.

Los resultados indican que es posible lograr una reducción significativa de la HC mediante la adopción de prácticas tales como la instalación de biofiltros para capturar la materia orgánica de las aguas residuales, el compostaje o la biodigestión para el aprovechamiento de la pulpa, la implementación de tecnologías que usen energía solar en el proceso de torrefacción y la optimización de la logística de transporte.

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento a la cooperativa Finca Triunfo Verde S.C. por su valiosa colaboración en este estudio. Su compromiso con una producción responsable y sostenible destaca como un ejemplo de lo que es posible lograr en la cafeticultura. Agradecemos por igual al Colegio de Postgraduados y al Conahcyt, por su apoyo institucional y el financiamiento que hizo posible esta investigación, desarrollada dentro del marco del proyecto: 319069 "*Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafeticultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas*".

Funding. Pronace Socioecological Systems and Sustainability of Conahcyt, through the Budget Program F003 "Strategic National Programs of Science, Technology and Linkage with the Social, Public and Private Sectors.

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Compliance with ethical standard. This research presents original data through interviews with personnel involved in the entire organic coffee production chain who previous informed consent was obtained.

Data availability. Data are available upon reasonable request from the corresponding author (martinb72@gmail.com)

Author contribution statement (CRediT). A. Villa-Herrera: fieldwork, methodology, software, investigation, original draft, data analysis and editing. **M.A. Bolaños González:** conceptualization, data curation, writing, data analysis and project administration. **F. Paz Pellat**: review and editing. **J.M. Salvador-Castillo**: validation, investigation, visualization and writing. LM Ramírez-Armas: validation, investigation, visualization and writing. C Villagómez-Jiménez: validation, investigation, visualization and writing - review and editing.

REFERENCES

Aguilar, R., 2012. Impacto socioeconómico y ambiental de la certificación orgánica-comercio justo de café (*Coffea arabica*) en la región Frailesca, Chiapas, México. Tesis Magister Scientiae en Socioeconomía Ambiental. CATIE, Turrialba, Costa Rica.

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. Tesis. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Honduras.

APHA, AWWA and WEF., 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. Health Association, 21th ed., Washington D.C., USA. 1200 pp.

Arellano, C. and Hernández, C., 2023. Carbon footprint and carbon storing capacity of arabica coffee plantations of Central

America: A review. *Coffee Science*, 18, p.e182072. https://doi.org/10.25186/.v18i.2072

Arias, H.J.J., Riaño, H.N.M., Riaño, B.A.M., Ariza, C.W., Posada, S.H.J., Valenzuela, A.J., Vega, C.M.A., Murgueitio, C.Y.P. and Castro, C.J.F., 2018. Determinación de la huella de carbono en el sistema de producción de café pergamino seco de cuatro municipios del sur del departamento del Huila (Colombia). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(2), pp.109-120. https://doi.org/10.22490/21456453.2283

Balma, M.C., 2018. Comparación de las emisiones de gases efecto invernadero para dos tecnologías de tratamiento de residuos de pulpa de café en Costa Rica. Universidad Nacional de Costa Rica, Facultad de las Ciencias de la Tierra y el Mar. Licenciatura en Gestión Ambiental con énfasis en Ingeniería Sanitaria. http://hdl.handle.net/11056/14192

Climate Transparency, 2022. Climate transparency report. G20 response to the energy crisis: critical for 1.5 °C. https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2022/10/CT2022-Summary-report.pdf

Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Tubiello, F.N. and Leip, A., 2021. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food*, 2(3), pp.198-209. https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9

Enríquez, A., González, E., Hara, S. and Laciau, P., 2020. La huella ambiental en las actividades agropecuarias, explorando el balance de gases de efecto invernadero en norpatagonia. *Presencia*, 31(74), pp.28-32. https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/140738

Fuentes, N. 2019. Evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales en beneficios de café en Costa Rica. Universidad Nacional de Costa Rica, Facultad de las Ciencias de la Tierra y el Mar. Licenciatura en Gestión Ambiental con énfasis en Ingeniería Sanitaria. http://hdl.handle.net/11056/18152

Giraldi-Díaz, M.R., De Medina-Salas, L., Castillo-González, E. and León-Lira, R., 2018. Environmental impact associated with the supply chain and production of grounding and roasting coffee through life cycle analysis. *Sustainability*, 10(12), pp. 4598. https://doi.org/10.3390/su10124598

Guerra, A.L., 2007. Construcción de la huella de carbono y logro de carbono neutralidad para el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza como requisito para optar por al grado de: Magister Scientiae en Socioeconomía Ambiental. Costa Rica. https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/4681

Hernández, J.J.A., Becerra, A.M.R., Camacho, W.A., Suárez, H.J.P., Andrade, J.V., Cano, M.A.V., Cortés, Y.P.M. and Chávez, J.F.C., 2018. Determinación de la huella de carbono en el sistema de producción de café pergamino seco de cuatro municipios del sur del departamento de Huila (Colombia). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(2), pp.109-120. https://doi.org/10.22490/21456453.2283

INEGI. 2010. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?ent=07

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. Agriculture, forestry and other land use IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe (eds.). Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/

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. https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2022. Climate Change., 2022. Mitigation of Climate Change. Working group III contribution to the Sixth Assessment Report

of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/

Jaisawal, B. and Agrawal, M., 2019. Carbon footprints of agriculture sector. En S. Muthu (Ed.), Carbon Footprints. Enviromental footprints and eco-designs of products and processes. *Springer*, pp.81-99. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7916-1_4

Lara, D.J.M., Marceleño, F.S.M.L. and Nagera, G.A., 2024. Café y Sostenibilidad: estudio de la Huella de Carbono en la producción y consumo de café. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 34(63), pp. 22. https://doi.org/10.24836/es.v34i63.1393

Liu, C., Plaza, B.D., Coulter, J.A., Kutcher, H.R., Beckie, H.J., Wang, L., Floc'h, J.B., Hamel, C., Siddique, K.H.M., Li, L. and Gan, Y., 2022. Diversifying crop rotations enhances agroecosystem services and resilience. *In Advances in Agronomy*, 173 pp. 299–335. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.02.007

Killian, B., Rivera, L., Soto, M. and Navichoc, D., 2013. Carbon footprint across the coffee supply chain: the case of Costa Rican coffee. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 3, pp. 151-170. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:26569235

Nab, C. and Maslin, M., 2020. Life cycle assessment synthesis of the carbon footprint of Arabica coffee: Case study of Brazil and Vietnam conventional and sustainable coffee production and export to the United Kingdom. *Geo Geography and Environment*, 7, pp.1-19. https://doi.org/10.1002/geo2.96

Noponen, M.R.A., Edwards, J.G., Haggar, J.P., Soto, G., Attarzadeh, N. and Healey, J.T., 2012. Greenhouse gas emissions in coffee grown with differing input levels under conventional and organic management. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 151, pp. 6-15. https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.01.019

Organización Internacional del Café (OIC)., 2021. Datos históricos de producción de café. https://www.ico.org/es/what-we-do/world-coffee-statistics-database/

Ortíz G,D., Vaast, P., Oelofse, M., Neergaard, A., Albrecht, A. and Rosenstock, T.S., 2017. Farm-scale greenhose gas balances, hotspots, and uncertainties in smallholder crop-livestock systems in Central Kenya. *Agricultura Ecosystems & Environment*, 248, pp.58-70. https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.002

PAS-2050., 2008. Guide to PAS 2050. How to assess the carbon footprint of goods and services. CARBON TRUST, Department for Environment Food and Rural Affairs and British Standards. http://shop.bsigroup.com/en/Browse-by-Secctor/Energy-- Utilities/PAS-2050/

PAS-2050., 2011. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. CARBON TRUST. Department for Environment Food and Rural Affairs. Department of Energy and Climate Change and British Standards. http://www.bsigroup.com/en/sectorsandservices/Forms/PAS-2050

Pathak, H., 2013. Greenhouse gas mitigation in Indian agriculture. *Annals of Agricultural Research*, 34(2), pp. 99-105. https://epubs.icar.org.in/index.php/AAR/article/view/37514/16812

Pramulya, R., Bantacut, T., Noor, E. and Yani, M., 2019. Carbon footprint calculation for Gayo Arabica Coffee primer processing. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 8(12), pp.2934-2938. https://doi.org/10.54319/jjbs/160218

Rees, R., Flack, S., Maxwell, K., and Mistry, A., 2014. *Air: Greenhouse gases from agriculture. In: Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, 1, pp. 293-304. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00088-7

Salinas, R., 2009. Caracterización y diagnóstico en tramos de los ríos Prusia, El Plan,Cuxtepeques, Negrito y el Rosario en la Reserva de la Biósfera "El Triunfo" (REBITRI) y su zona de influencia, Chiapas, México. pp. 94. https://biblioteca.ecosur.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=42902

Schneider, H, and Samaniego, J., 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. pp. 46.

SEMARNAP., 1998. Programa de manejo de la Reserva de la Biosfera el Triunfo. pp.109.

Segura, M.A. and Andrade, H.J., 2012. Huella de carbono en cadenas productivas de café (*Coffea Arabica* l.) con diferentes estándares de certificación en Costa Rica. *Luna Azul* 35, pp. 60-77. http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n35/n35a05.pdf

Skiba, U. and Rees, R., 2014. Nitrous oxide, climate change and agriculture. *Cab Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 9, pp. 7 https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20149010

Sistema de Información Agroalimentaria y Pesca-Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. SIACON-SAGARPA., 2024. https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/

Soto, L. and Aguirre, C., 2015. Carbon Stocks in Organic Coffee Systems in Chiapas, México. *Journal of Agricultural Science*, 7(1), pp. 117-128. http://doi.org/10.5539/jas.v7n1p117

Trikilidou, E., Samiotis, G., Tsikritzis, L. and Amanatidou, E., 2020. Performance of Semi-Micro-Kjeldahl Nitrogen Method – uncertainty and nitrate interference. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(18), pp. 1-11. https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1807967

Trinh, L.T.K., Hu, A.H., Lan, Y.C. and Chen, Z.H., 2020. Comparative life cycle assessment for conventional and organic coffee cultivation in Vietnam. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 17, pp. 1307-1324. https://doi.org/10.1007/s13762-019-02539-5

van Rikxoort, H., Schroth, G., Läderach, P. and Rodríguez-Sánchez, B., 2014. Carbon footprints and carbon stocks reveal climate-friendly coffee production. *Agronomy for Sustainable Development*. 34(4), pp. 887-897. https://doi.org/10.1007/s13593-014-0223-8

Wright, L., Kemp, S. and Williams, I., 2011. 'Carbon footprinting': towards a universally accepted definition. *Carbon Management*, 2(1), pp. 61 - 72. https://doi.org/10.4155/cmt.10.39