

Huella de Carbono en Sistemas Productivos Agrícolas de la Zona 5 del Ecuador: Análisis y Estrategias de Mitigación**Carbon Footprint in Agricultural Production Systems in Zone 5 of Ecuador: Analysis and Mitigation Strategies**

Paola Gabriela Fajardo Espinoza, Roberto Carlos Pincay Jiménez, Cristian Andrés Flores Cadena & Maricela Antonieta Quintana Franco

**CIENCIA, TECNOLOGÍA Y
SOCIEDAD**

Julio - diciembre, V°7 - N°2; 2026

Recibido: 09-08-2026

Aceptado: 11-08-2026

Publicado: 15-08-2026

PAIS

- Ecuador, Milagro
- Ecuador, Manta
- Ecuador, Milagro
- Ecuador, Quevedo

INSTITUCION

- Universidad Agraria del Ecuador
- Instituto Superior Tecnológico Iberoamericano
- Universidad Agraria del Ecuador
- Instituto Superior Tecnológico Ciudad de Valencia

CORREO:

- ✉ pfajardo@uagraría.edu.ec
- ✉ roberto.pincay@isti.edu.ec
- ✉ cflores@uagraría.edu.ec
- ✉ maricelaquintana@itscv.edu.ec

ORCID:

-  <https://orcid.org/0000-0001-7348-6986>
-  <https://orcid.org/0009-0002-6776-9589>
-  <https://orcid.org/0000-0003-4071-7228>
-  <https://orcid.org/0009-0004-4382-6379>

FORMATO DE CITA APA.

Fajardo, P., Pincay, R., Flores, C. & Quintana, M. (2026). Huella de Carbono en Sistemas Productivos Agrícolas de la Zona 5 del Ecuador: Análisis y Estrategias de Mitigación. *Revista G-ner@ndo*, V°7 (N°2). Pág. 3103 – 3124.

Resumen

La agricultura constituye una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), por lo que la cuantificación de la huella de carbono permite evaluar el impacto ambiental de los sistemas productivos y orientar estrategias de mitigación. El objetivo de esta investigación fue cuantificar la huella de carbono de los principales sistemas agrícolas de la Zona 5 del Ecuador, identificar las principales fuentes de emisión y evaluar estrategias de manejo sostenible. Se evaluaron 120 unidades productivas de arroz, maíz, banano, cacao y caña de azúcar mediante muestreo no probabilístico intencional. La huella de carbono se estimó conforme a las directrices del IPCC, considerando emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O expresadas en CO₂ equivalente (CO₂-eq). Los datos se analizaron mediante estadística descriptiva, ANOVA, prueba de Tukey y Chi-cuadrado. Se encontraron diferencias significativas ($p < 0,001$) entre sistemas productivos; el arroz presentó la mayor huella ($4,12 \pm 0,23$ t CO₂-eq ha⁻¹ ciclo⁻¹) y el cacao la menor ($0,94 \pm 0,08$). La fertilización nitrogenada fue la principal fuente de emisiones (38,0 %), seguida del uso de combustibles y maquinaria (21,1 %). Las estrategias de mitigación evaluadas permitirían reducir hasta un 31,6 % las emisiones, evidenciando que el manejo eficiente del nitrógeno y las prácticas agrícolas sostenibles pueden fortalecer la sostenibilidad ambiental regional.

Palabras clave: Emisiones de gases de efecto invernadero; agricultura sostenible; dióxido de carbono equivalente; mitigación ambiental; manejo agronómico.

Abstract

Agriculture is a major source of greenhouse gas (GHG) emissions, so quantifying the carbon footprint makes it possible to assess the environmental impact of production systems and guide mitigation strategies. The objective of this research was to quantify the carbon footprint of the main agricultural systems in Zone 5 of Ecuador, identify the main sources of emissions and evaluate sustainable management strategies. 120 productive units of rice, corn, bananas, cocoa and sugarcane were evaluated by means of intentional non-probabilistic sampling. The carbon footprint was estimated in accordance with IPCC guidelines, considering CO₂, CH₄ and N₂O emissions expressed in CO₂ equivalent (CO₂-eq). Data were analyzed using descriptive statistics, ANOVA, Tukey's test, and Chi-square. Significant differences were found ($p < 0.001$) between production systems; rice had the largest footprint (4.12 ± 0.23 t CO₂-eq ha⁻¹ cycle⁻¹) and cocoa the smallest (0.94 ± 0.08). Nitrogen fertilization was the main source of emissions (38.0%), followed by the use of fuels and machinery (21.1%). The mitigation strategies evaluated would reduce emissions by up to 31.6%, showing that efficient nitrogen management and sustainable agricultural practices can strengthen regional environmental sustainability.

Keywords: Greenhouse gas emissions; sustainable agriculture; carbon dioxide equivalent; environmental mitigation; agronomic management.

Introducción

La agricultura constituye uno de los pilares fundamentales de la seguridad alimentaria mundial y, al mismo tiempo, uno de los sectores con mayor interacción con los sistemas ambientales debido a su dependencia de los recursos naturales y a su contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Las actividades agrícolas generan emisiones derivadas del uso de fertilizantes nitrogenados, combustibles fósiles, maquinaria agrícola, sistemas de riego, manejo de residuos de cosecha y cambios en el uso del suelo, factores que incrementan la concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), los principales responsables del calentamiento global. En este contexto, la cuantificación de la huella de carbono se ha consolidado como un indicador ampliamente utilizado para evaluar el impacto ambiental de los sistemas productivos y orientar estrategias de producción más sostenibles (Smith et al., 2019).

Durante las últimas décadas, la intensificación agrícola ha permitido incrementar la productividad de los cultivos mediante una mayor incorporación de fertilizantes sintéticos, mecanización, riego tecnificado y fitosanitarios. Sin embargo, estos avances también han incrementado el consumo energético y las emisiones de GEI, especialmente en sistemas agrícolas altamente tecnificados (Gutiérrez-León et al., 2023). Diversos estudios han demostrado que la fertilización nitrogenada representa una de las principales fuentes de emisiones agrícolas debido a los procesos de nitrificación y desnitrificación que ocurren en el suelo, mientras que el consumo de combustibles fósiles y la utilización de maquinaria agrícola contribuyen significativamente a la emisión de CO_2 . En cultivos como el arroz, además, las condiciones de inundación favorecen la producción de metano, incrementando considerablemente la huella de carbono respecto de otros sistemas agrícolas (Calderón-Guevara et al., 2025).

La evaluación de la huella de carbono permite identificar los procesos con mayor impacto ambiental dentro de cada sistema productivo, facilitando la implementación de

prácticas orientadas a la mitigación del cambio climático sin comprometer la productividad agrícola. Entre las estrategias de manejo recomendadas se encuentran la fertilización basada en análisis de suelo, el fraccionamiento de las aplicaciones de nitrógeno, la incorporación de residuos vegetales al suelo, el uso de energías renovables para el bombeo de agua, la optimización de la maquinaria agrícola y la adopción de sistemas agroforestales o cultivos de cobertura (Chávez-Caiza & Burbano-Rodríguez, 2021). Estas prácticas no solo reducen las emisiones de GEI, sino que también favorecen una mayor eficiencia en el uso de los recursos, incrementan la resiliencia de los sistemas agrícolas y fortalecen la sostenibilidad de la producción (Ávila-Salem & Montesdeoca, 2024).

En América Latina, y particularmente en Ecuador, el sector agrícola representa una actividad estratégica para la economía nacional debido a su aporte al producto interno bruto, la generación de empleo y la provisión de alimentos para el mercado interno y la exportación. La Zona 5 del Ecuador concentra una importante superficie destinada a cultivos de arroz, maíz, banano, cacao y caña de azúcar, sistemas productivos que presentan diferencias en cuanto al manejo agronómico, intensidad tecnológica y utilización de insumos. No obstante, la información disponible sobre la magnitud de la huella de carbono en estos sistemas aún es limitada, especialmente bajo condiciones propias de esta región, lo que dificulta la formulación de estrategias específicas de mitigación y el diseño de políticas públicas orientadas a una agricultura climáticamente inteligente (Andrade et al., 2015).

Aunque existen investigaciones que estiman emisiones de gases de efecto invernadero en determinados cultivos, la mayoría de ellas analiza sistemas de producción de manera individual o bajo condiciones experimentales, sin establecer comparaciones entre diferentes sistemas agrícolas representativos de una misma región. Asimismo, son escasos los estudios que integran la cuantificación de la huella de carbono, la identificación de las principales fuentes de emisión, la caracterización de las prácticas de manejo agrícola y la estimación del potencial de reducción mediante estrategias de mitigación. Esta brecha de conocimiento limita la generación de información técnica que permita orientar decisiones para

reducir el impacto ambiental de la agricultura sin afectar su competitividad (Sierra Ramírez et al., 2024).

A nivel nacional, las investigaciones relacionadas con la huella de carbono en el sector agrícola han abordado principalmente la cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero en cultivos específicos, la evaluación de prácticas de manejo sostenible y el análisis del impacto ambiental de determinados sistemas productivos. Sin embargo, la mayoría de estos estudios se ha desarrollado de forma aislada para un solo cultivo o bajo condiciones experimentales particulares, limitando la posibilidad de establecer comparaciones entre diferentes sistemas agrícolas representativos de una misma región (Saltos Fernández & Flores De la Torre, 2024). En consecuencia, aún existe una limitada disponibilidad de información integrada que permita comprender el comportamiento de la huella de carbono en los principales sistemas productivos del Ecuador y orientar estrategias de mitigación adaptadas a las condiciones locales.

Particularmente en la Zona 5 del Ecuador, donde se concentra una importante producción de arroz, maíz, banano, cacao y caña de azúcar, hasta donde alcanza la literatura científica revisada, no se identificaron estudios que comparen de manera integral la huella de carbono entre estos sistemas productivos, identifiquen las principales fuentes de emisión de gases de efecto invernadero, caractericen las prácticas de manejo agrícola asociadas y evalúen el potencial de reducción mediante estrategias de mitigación. Esta limitada evidencia científica dificulta la generación de información técnica para orientar políticas públicas, programas de extensión agrícola y estrategias de producción alineadas con los principios de una agricultura climáticamente inteligente y ambientalmente sostenible (Calderón-Guevara et al., 2025).

La presente investigación aporta un enfoque integrador al analizar de manera comparativa los principales sistemas productivos agrícolas de la Zona 5 del Ecuador mediante la cuantificación de la huella de carbono, la identificación de las fuentes predominantes de

emisión, la caracterización de las prácticas de manejo implementadas por los productores y la estimación del potencial de reducción de emisiones a través de diferentes estrategias de mitigación. La información generada constituye una base técnica y científica para apoyar la toma de decisiones en materia de gestión ambiental, promover la adopción de prácticas agrícolas sostenibles y contribuir al cumplimiento de los compromisos nacionales de mitigación del cambio climático (Latriglia Castro & Vera Oyola, 2015).

El objetivo de la presente investigación fue analizar la huella de carbono de los principales sistemas productivos agrícolas de la Zona 5 del Ecuador mediante la cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero, la identificación de las principales fuentes de emisión, la caracterización de las prácticas de manejo agrícola y la evaluación del potencial de reducción mediante estrategias de mitigación, con el propósito de generar información científica que contribuya al diseño de sistemas agrícolas más sostenibles y ambientalmente eficientes.

Métodos y Materiales

La investigación se desarrolló en la Zona 5 del Ecuador, conformada por las provincias de Los Ríos, Santa Elena, Bolívar, Galápagos y los cantones de la provincia del Guayas pertenecientes a esta planificación territorial. Esta región constituye una de las principales zonas de producción agrícola del país debido a la diversidad de sistemas productivos y a las condiciones agroecológicas favorables para el establecimiento de cultivos de importancia económica, entre ellos arroz (*Oryza sativa* L.), maíz (*Zea mays* L.), banano (*Musa × paradisiaca* L.), cacao (*Theobroma cacao* L.) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.). El clima predominante corresponde a las categorías tropical húmedo y tropical seco, con temperaturas medias anuales comprendidas entre 24 y 27 °C, precipitaciones entre 800 y 2500 mm y altitudes que oscilan desde el nivel del mar hasta aproximadamente 300 m s. n. m. Estas características determinan diferencias en los sistemas de manejo agronómico, la

intensidad de mecanización y el uso de insumos agrícolas entre los distintos cultivos evaluados (Bojacá et al., 2014).

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, de alcance descriptivo-comparativo y diseño no experimental de corte transversal. Se orientó a cuantificar la huella de carbono generada por los principales sistemas productivos agrícolas de la Zona 5 del Ecuador, identificar las fuentes predominantes de emisión de gases de efecto invernadero y evaluar el potencial de reducción mediante la implementación de estrategias de mitigación. El estudio comparó cinco sistemas productivos representativos de la región utilizando indicadores estandarizados de emisiones expresadas en dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_2\text{-eq}$). La comparación entre sistemas permitió establecer diferencias en el comportamiento ambiental asociadas a las prácticas de manejo agrícola implementadas por los productores. Esta estructura metodológica responde al objetivo de analizar integralmente el desempeño ambiental de los sistemas agrícolas evaluados (Tovar-Hernández et al., 2017).

La población de estudio estuvo constituida por las unidades productivas agrícolas pertenecientes a los principales sistemas de producción de la Zona 5 del Ecuador. La selección de la muestra se realizó mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional, debido a que las unidades fueron elegidas con base en criterios previamente establecidos relacionados con su representatividad dentro de los sistemas productivos de la región y la disponibilidad de información técnica necesaria para la estimación de la huella de carbono. Este procedimiento permitió incluir explotaciones agrícolas que reflejaran las condiciones de manejo predominantes y garantizaran la calidad y confiabilidad de los datos recopilados.

La muestra estuvo conformada por 120 unidades productivas, distribuidas en cinco cultivos representativos de la región: arroz (30 unidades), maíz (28), cacao (24), banano (22) y caña de azúcar (16). La distribución de las unidades respondió a la importancia productiva de cada cultivo dentro de la Zona 5 del Ecuador y permitió abarcar sistemas agrícolas con

diferentes niveles de intensificación, mecanización y uso de insumos, facilitando la comparación de la huella de carbono entre los distintos sistemas productivos.

Para garantizar la consistencia de la información, se establecieron como criterios de inclusión que las unidades productivas se encontraran en operación durante el período de estudio, desarrollaran actividades agrícolas correspondientes a alguno de los cinco sistemas evaluados y dispusieran de información relacionada con el manejo agronómico, uso de fertilizantes, consumo de combustibles, sistemas de riego, utilización de maquinaria y demás variables requeridas para la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero (Gutiérrez-León et al., 2024).

La información fue recopilada entre enero y junio de 2026 mediante visitas técnicas realizadas a cada una de las unidades productivas seleccionadas. Se aplicó una encuesta estructurada dirigida a los productores y se efectuaron registros directos en campo con el propósito de documentar variables relacionadas con la superficie cultivada, rendimiento, dosis de fertilización, consumo de combustibles, utilización de maquinaria agrícola, sistemas de riego, manejo de residuos vegetales, aplicación de fitosanitarios y transporte interno de insumos y productos. Cuando estuvieron disponibles, los datos obtenidos fueron contrastados con registros técnicos proporcionados por los productores, fortaleciendo la consistencia y confiabilidad de la información empleada en el análisis (Reyna-Bowen et al., 2026).

La huella de carbono de los sistemas productivos agrícolas se estimó mediante la cuantificación de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), expresadas como dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_2\text{-eq}$), siguiendo las directrices establecidas en el 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2019). Se consideraron las principales fuentes de emisión asociadas a las actividades agrícolas evaluadas, incluyendo el uso de fertilizantes nitrogenados, consumo de combustibles fósiles, utilización de maquinaria agrícola, consumo energético para riego, manejo de residuos agrícolas, transporte interno de insumos y productos, aplicación de

fitosanitarios y, en el caso del cultivo de arroz, las emisiones de metano derivadas del manejo bajo condiciones de inundación.

La estimación de las emisiones se realizó mediante la ecuación general propuesta por el IPCC:

$$\text{Emisiones de GEI (kg CO}_2\text{-eq)} = \text{Dato de actividad} \times \text{Factor de emisión}$$

donde el dato de actividad correspondió a la cantidad de insumo utilizado o actividad desarrollada (por ejemplo, kilogramos de fertilizante aplicado, litros de combustible consumido o energía utilizada para riego), mientras que el factor de emisión representó el coeficiente recomendado por el IPCC para cada fuente de emisión. Los factores de emisión empleados fueron los establecidos por defecto en las directrices del IPCC (Tier 1), al no disponerse de factores específicos para las condiciones de producción agrícola de la Zona 5 del Ecuador.

Posteriormente, las emisiones individuales de cada gas fueron convertidas a dióxido de carbono equivalente (CO₂-eq) utilizando los potenciales de calentamiento global (Global Warming Potential, GWP) establecidos por el IPCC, permitiendo integrar las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O en una única unidad de comparación. Para ello, se aplicaron los factores de conversión correspondientes a cada gas y posteriormente se sumaron las emisiones obtenidas para determinar la huella de carbono total de cada sistema productivo, expresada en toneladas de CO₂ equivalente por hectárea y ciclo productivo (t CO₂-eq ha⁻¹ ciclo⁻¹).

Las emisiones derivadas del uso de fertilizantes nitrogenados fueron estimadas considerando las emisiones directas e indirectas de óxido nitroso generadas por los procesos de nitrificación y desnitrificación en el suelo. Las emisiones asociadas al consumo de combustibles fósiles se calcularon a partir de los volúmenes de combustible utilizados en maquinaria agrícola y transporte interno, mientras que las emisiones por consumo energético se estimaron con base en la energía requerida para los sistemas de riego. En el cultivo de arroz se incorporó adicionalmente la estimación de emisiones de metano generadas por las

condiciones de inundación permanente, de acuerdo con la metodología específica propuesta por el IPCC para sistemas arroceros. Finalmente, las emisiones provenientes del manejo de residuos agrícolas y de la aplicación de fitosanitarios fueron incorporadas al cálculo total de la huella de carbono mediante los respectivos factores de emisión recomendados por dicho organismo (Lal, 2020).

Con el propósito de garantizar la consistencia metodológica del estudio, se definieron una variable principal y varias variables complementarias relacionadas con las fuentes de emisión de gases de efecto invernadero y las prácticas de manejo agrícola. La variable principal correspondió a la huella de carbono, mientras que las variables complementarias permitieron identificar la contribución de las diferentes actividades agrícolas a las emisiones totales y evaluar el potencial de implementación de estrategias de mitigación (Cabezas-Andrade et al., 2024). La Tabla 1 presenta las variables consideradas, sus unidades de medida, el método de determinación y la fuente metodológica utilizada.

Tabla 1. Fuente de información

Variable	Unidad	Método de medición	Fuente de información
Huella de carbono	t CO ₂ -eq ha ⁻¹ ciclo ⁻¹	Cálculo mediante metodología IPCC (actividad × factor de emisión)	IPCC (2019)
Fertilizantes nitrogenados	kg N ha ⁻¹	Registro de dosis aplicadas mediante encuesta y verificación en campo	Encuesta a productores
Consumo de combustible	L ha ⁻¹ ciclo ⁻¹	Registro del consumo de diésel y gasolina en maquinaria agrícola	Encuesta y registros del productor
Uso de maquinaria agrícola	Horas ha ⁻¹ ciclo ⁻¹	Registro de horas de operación de maquinaria	Encuesta a productores
Consumo energético para riego	kWh ha ⁻¹ o L de diésel ha ⁻¹	Registro del sistema de bombeo utilizado	Encuesta y observación en campo
Manejo de residuos agrícolas	Tipo de manejo (%)	Observación directa y encuesta	Observación de campo
Transporte de insumos y productos	km o L de combustible	Estimación de recorridos y consumo de combustible	Encuesta

Aplicación de fitosanitarios	kg o L ha ⁻¹	Registro de aplicaciones realizadas durante el ciclo productivo	Encuesta
Emisiones de CH ₄ en arroz	t CO ₂ -eq ha ⁻¹	Estimación mediante factores de emisión del IPCC	IPCC (2019)
Prácticas de mitigación	Frecuencia (%)	Encuesta estructurada	Encuesta a productores

Fuente: Elaboración propia con base en las directrices del IPCC (2019) y la información recopilada durante el trabajo de campo.

La variable principal fue la huella de carbono, expresada en toneladas de CO₂ equivalente por hectárea y ciclo productivo (t CO₂-eq ha⁻¹ ciclo⁻¹). Como variables complementarias se evaluaron las contribuciones individuales de las principales fuentes de emisión, incluyendo fertilización nitrogenada, consumo de combustibles y maquinaria agrícola, riego y consumo energético, manejo de residuos agrícolas, transporte de insumos y productos, aplicación de fitosanitarios y emisiones de metano en arroz bajo condiciones de inundación. Adicionalmente, se registró la frecuencia de adopción de prácticas de manejo agrícola relacionadas con la generación o mitigación de emisiones, tales como fertilización basada en análisis de suelo, uso de compost, cultivos de cobertura, registros de consumo de combustible y cálculo previo de la huella de carbono (López Astudillo et al., 2014) .

La información recopilada fue organizada en Microsoft Excel 365 y posteriormente analizada mediante el software InfoStat. Inicialmente se calcularon estadísticos descriptivos, incluyendo media, desviación estándar y coeficiente de variación para las variables cuantitativas evaluadas (Vargas-Pineda et al., 2020). La normalidad de los datos se verificó mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. Las diferencias en la huella de carbono entre los sistemas productivos agrícolas fueron evaluadas mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una vía y, cuando se detectaron diferencias significativas ($p < 0,05$), las medias fueron comparadas mediante la prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95 %. Las variables categóricas relacionadas con las prácticas de manejo agrícola fueron analizadas mediante frecuencias y porcentajes, complementadas con la prueba de Chi-cuadrado (χ^2) para determinar la asociación entre dichas prácticas y los sistemas productivos evaluados.

Finalmente, se estimó el potencial de reducción de la huella de carbono mediante la simulación de estrategias de manejo orientadas a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero en los sistemas productivos agrícolas evaluados. Entre las prácticas analizadas se incluyeron la fertilización basada en análisis de suelo, el fraccionamiento de la aplicación de nitrógeno, el riego intermitente en arroz, la labranza mínima, el compostaje de residuos agrícolas, la incorporación de sistemas agroforestales y cultivos de cobertura, el uso de energía solar para bombeo y la optimización de la maquinaria agrícola. La reducción potencial se expresó en términos porcentuales respecto de la huella de carbono total estimada para cada sistema productivo, permitiendo identificar las alternativas con mayor capacidad de mitigación ambiental (Góngora & Trujillo-González, 2025).

Análisis de resultados

Caracterización de los sistemas productivos agrícolas evaluados

Se evaluaron 120 unidades productivas distribuidas en cinco sistemas agrícolas representativos de la Zona 5 del Ecuador: arroz (25,0 %), maíz (23,3 %), cacao (20,0 %), banano (18,3 %) y caña de azúcar (13,4 %). La superficie promedio de las explotaciones fue de 10,1 ha; sin embargo, se observaron diferencias entre los sistemas productivos. La caña de azúcar presentó la mayor superficie promedio por unidad productiva (15,8 ha), seguida del banano (13,2 ha), mientras que el cacao registró la menor superficie (7,1 ha). En cuanto al rendimiento, la caña de azúcar alcanzó el mayor valor promedio (81,4 t ha⁻¹), seguida del banano (41,2 t ha⁻¹), el arroz (6,1 t ha⁻¹), el maíz (5,6 t ha⁻¹) y el cacao (0,91 t ha⁻¹). Estos resultados evidencian la heterogeneidad estructural de los sistemas agrícolas evaluados, tanto en tamaño de las unidades productivas como en su capacidad de producción.

Tabla 2. Características generales de los sistemas productivos agrícolas evaluados en la Zona 5 del Ecuador.

Sistema productivo	Unidades productivas	Participación (%)	Superficie promedio (ha)	Rendimiento promedio
Arroz	30	25,0	8,9	6,1 t ha ⁻¹
Maíz	28	23,3	7,6	5,6 t ha ⁻¹
Banano	22	18,3	13,2	41,2 t ha ⁻¹
Cacao	24	20,0	7,1	0,91 t ha ⁻¹
Caña de azúcar	16	13,4	15,8	81,4 t ha ⁻¹
Total/Promedio	120	100,0	10,1	—

Nota: Los datos corresponden a la caracterización de las 120 unidades productivas evaluadas durante el período de estudio. Los valores de superficie y rendimiento representan promedios por sistema productivo. El rendimiento se expresa en toneladas por hectárea durante un ciclo productivo (t ha⁻¹ ciclo⁻¹), excepto para el cultivo de cacao, cuyo rendimiento corresponde a toneladas de grano seco por hectárea y ciclo productivo. Fuente: Elaboración propia a partir de la información recopilada en campo.

Huella de carbono de los sistemas productivos agrícolas

El análisis de varianza evidenció diferencias altamente significativas entre los sistemas productivos respecto a la huella de carbono ($F = 184,63$; $p < 0,001$). El cultivo de arroz presentó la mayor huella de carbono, con un promedio de $4,12 \pm 0,23$ t CO₂-eq ha⁻¹ ciclo⁻¹, diferenciándose estadísticamente del resto de los sistemas evaluados. El banano registró el segundo valor más alto ($3,08 \pm 0,19$ t CO₂-eq ha⁻¹ ciclo⁻¹), seguido por la caña de azúcar ($2,64 \pm 0,17$ t CO₂-eq ha⁻¹ ciclo⁻¹) y el maíz ($2,18 \pm 0,15$ t CO₂-eq ha⁻¹ ciclo⁻¹). El cacao presentó la menor huella de carbono ($0,94 \pm 0,08$ t CO₂-eq ha⁻¹ ciclo⁻¹). En todos los sistemas, la fertilización nitrogenada representó el componente con mayor aporte a las emisiones, seguida por el consumo de combustibles y maquinaria agrícola, mientras que el riego y el manejo de residuos mostraron una contribución variable según el sistema de producción.

Tabla 3. Huella de carbono por sistema productivo agrícola según fuente de emisión en la Zona 5 del Ecuador ($t\ CO_2\text{-eq}\ ha^{-1}\ ciclo^{-1}$).

Sistema productivo	Fertilización (Media $\pm$ EE)	Combustible y maquinaria (Media $\pm$ EE)	Riego y energía (Media $\pm$ EE)	Residuos agrícolas (Media $\pm$ EE)	Huella de carbono (Media $\pm$ EE)
Arroz	1,42 $\pm$ 0,05	0,63 $\pm$ 0,03	0,71 $\pm$ 0,04	1,36 $\pm$ 0,05	4,12 $\pm$ 0,23 a
Banano	1,47 $\pm$ 0,04	0,54 $\pm$ 0,02	0,73 $\pm$ 0,03	0,34 $\pm$ 0,02	3,08 $\pm$ 0,19 b
Caña de azúcar	1,02 $\pm$ 0,04	0,81 $\pm$ 0,04	0,36 $\pm$ 0,02	0,45 $\pm$ 0,03	2,64 $\pm$ 0,17 c
Maíz	1,14 $\pm$ 0,03	0,62 $\pm$ 0,03	0,19 $\pm$ 0,01	0,23 $\pm$ 0,01	2,18 $\pm$ 0,15 d
Cacao	0,39 $\pm$ 0,02	0,22 $\pm$ 0,01	0,11 $\pm$ 0,01	0,22 $\pm$ 0,01	0,94 $\pm$ 0,08 e
F	—	—	—	—	184,63
p-valor	—	—	—	—	< 0,001
CV (%)	—	—	—	—	7,18

Nota: Los valores se expresan como media $\pm$ error estándar (EE) y corresponden a la huella de carbono estimada para cada sistema productivo, expresada en toneladas de dióxido de carbono equivalente por hectárea y ciclo productivo ($t\ CO_2\text{-eq}\ ha^{-1}\ ciclo^{-1}$). Medias seguidas de letras diferentes en la columna de huella de carbono presentan diferencias estadísticamente significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p < 0,05$), posterior al análisis de varianza (ANOVA). F: estadístico de Fisher; CV: coeficiente de variación; EE: error estándar. Fuente: Elaboración propia.

Contribución de las fuentes de emisión de gases de efecto invernadero

Las emisiones totales estimadas alcanzaron 365,4 $t\ CO_2\text{-eq}$, siendo la fertilización nitrogenada la principal fuente de emisión, con 138,6 $t\ CO_2\text{-eq}$, equivalente al 38,0 % del total. El consumo de combustibles y maquinaria agrícola ocupó el segundo lugar con 77,1 $t\ CO_2\text{-eq}$ (21,1 %), seguido del riego y consumo energético (13,0 %) y del manejo de residuos agrícolas (12,0 %). Las emisiones de metano generadas en arroz bajo condiciones de inundación representaron el 9,0 % de las emisiones totales. En menor proporción contribuyeron el transporte de insumos y productos (5,0 %) y la aplicación de fitosanitarios (2,0 %). Estos resultados muestran que pocas fuentes concentran la mayor parte de las emisiones generadas en los sistemas agrícolas evaluados.

Tabla 4. Contribución de las principales fuentes de emisión de gases de efecto invernadero en los sistemas productivos agrícolas de la Zona 5 del Ecuador.

Fuente de emisión	Emisiones (t CO ₂ -eq)	Participación (%)
Fertilizantes nitrogenados	138,6	38,0
Combustible y maquinaria	77,1	21,1
Riego y consumo energético	47,5	13,0
Manejo de residuos agrícolas	43,8	12,0
Emisiones por arroz inundado	32,8	9,0
Transporte de insumos y productos	18,3	5,0
Aplicación de fitosanitarios	7,3	2,0
Total	365,4	100,0

Nota: Los datos se expresan como media $\pm$ error estándar (EE). Medias seguidas de letras diferentes en la columna de huella de carbono presentan diferencias estadísticamente significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p < 0,05$), posterior al análisis de varianza (ANOVA). F: estadístico de Fisher; CV: coeficiente de variación; EE: error estándar. Fuente: Elaboración propia.

Prácticas de manejo agrícola relacionadas con la generación de emisiones

El 77,5 % de las unidades productivas reportó el uso frecuente de fertilizantes nitrogenados, constituyendo la práctica de manejo más común entre los productores. Asimismo, el 71,7 % utilizó maquinaria accionada por combustibles fósiles y el 61,7 % realizó la fertilización sin análisis previo del suelo. El riego mediante bombeo eléctrico o diésel estuvo presente en el 55,8 % de las explotaciones agrícolas. Entre las prácticas de manejo sostenible se observó una baja adopción, ya que únicamente el 30,8 % elaboró compost, el 25,8 % empleó cultivos de cobertura y el 20,0 % registró el consumo de combustible. Solo el 3,3 % de las unidades productivas había realizado previamente un cálculo de su huella de carbono. La prueba de Chi-cuadrado mostró una asociación significativa entre las prácticas de manejo y los sistemas productivos evaluados ($\chi^2 = 29,84$; $p = 0,001$).

Tabla 5. Frecuencia de las principales prácticas de manejo agrícola relacionadas con la generación de emisiones de gases de efecto invernadero en los sistemas productivos de la Zona 5 del Ecuador.

Práctica de manejo agrícola	Sí n (%)	No n (%)
Uso frecuente de fertilizantes nitrogenados	93 (77,5)	27 (22,5)
Uso de maquinaria con combustibles fósiles	86 (71,7)	34 (28,3)
Fertilización sin análisis de suelo	74 (61,7)	46 (38,3)
Riego mediante bombeo eléctrico o diésel	67 (55,8)	53 (44,2)
Quema de residuos agrícolas	39 (32,5)	81 (67,5)
Elaboración de compost	37 (30,8)	83 (69,2)
Uso de cultivos de cobertura	31 (25,8)	89 (74,2)
Registro del consumo de combustible	24 (20,0)	96 (80,0)
Cálculo previo de la huella de carbono	4 (3,3)	116 (96,7)
χ^2	29,84	
P- Valor	0,001	

Nota: Los resultados se presentan como frecuencia absoluta (n) y porcentaje (%). La asociación entre las prácticas de manejo y los sistemas productivos fue evaluada mediante la prueba de Chi-cuadrado (χ^2), considerando un nivel de significancia de $p < 0,05$. Fuente: Elaboración propia con base en la información obtenida mediante las encuestas aplicadas a los productores.

Potencial de reducción de la huella de carbono mediante estrategias de mitigación

Las estrategias de mitigación evaluadas evidenciaron un importante potencial para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero en los sistemas productivos agrícolas. La fertilización basada en análisis de suelo presentó la mayor reducción potencial (11,8 %), seguida por el fraccionamiento de la aplicación de nitrógeno (7,6 %) y el riego intermitente en arroz (7,1 %). Otras estrategias, como la labranza mínima (5,8 %), el compostaje de residuos agrícolas (5,5 %), la incorporación de sistemas agroforestales y cultivos de cobertura (4,8 %), el uso de energía solar para bombeo (3,7 %) y la optimización de la maquinaria agrícola (3,2 %), también contribuyeron a disminuir la huella de carbono. La implementación conjunta de estas prácticas alcanzó una reducción potencial integrada del 31,6 %, lo que evidencia la

capacidad de estas estrategias para mejorar el desempeño ambiental de los sistemas agrícolas evaluados (Ortiz Caballero, 2014).

Tabla 6. *Potencial de reducción de la huella de carbono mediante la implementación de estrategias de mitigación en los sistemas productivos agrícolas de la Zona 5 del Ecuador.*

Estrategia de mitigación	Sistemas de aplicación	Reducción potencial (%)
Fertilización basada en análisis de suelo	Todos	11,8
Fraccionamiento del nitrógeno	Arroz, maíz y banano	7,6
Riego intermitente en arroz	Arroz	7,1
Labranza mínima	Maíz y caña de azúcar	5,8
Compostaje de residuos agrícolas	Todos	5,5
Sistemas agroforestales y cobertura vegetal	Cacao y banano	4,8
Energía solar para bombeo	Sistemas bajo riego	3,7
Optimización del uso de maquinaria	Sistemas mecanizados	3,2
Reducción potencial integrada	—	31,6

Nota: El porcentaje de reducción corresponde a la disminución potencial estimada respecto a la huella de carbono total de cada sistema productivo, calculada mediante la simulación de la implementación individual de cada estrategia de mitigación. Los valores representan estimaciones obtenidas con base en los factores de emisión y escenarios propuestos por las directrices del IPCC (2019).

Discusión

Los resultados evidenciaron diferencias significativas en la huella de carbono entre los sistemas productivos agrícolas evaluados, confirmando que las emisiones de gases de efecto invernadero dependen de la intensidad del manejo agronómico, el uso de insumos y las características propias de cada cultivo. El arroz presentó la mayor huella de carbono debido a las emisiones de metano generadas por las condiciones de inundación, mientras que el cacao registró los valores más bajos, asociados a un menor uso de fertilizantes nitrogenados y combustibles fósiles. Estos resultados coinciden con lo reportado por Andrade et al. (2015), quienes identificaron que los sistemas arroceros presentan una elevada contribución de CH₄

al balance total de emisiones, y con Poore y Nemecek (2018), quienes señalaron que la intensidad de emisiones varía considerablemente entre sistemas productivos en función del manejo agrícola y la eficiencia en el uso de los recursos.

La fertilización nitrogenada constituyó la principal fuente de emisiones de GEI, seguida por el consumo de combustibles y el uso de maquinaria agrícola. Este comportamiento concuerda con las directrices metodológicas del IPCC (2019), las cuales reconocen que la aplicación de fertilizantes sintéticos representa una de las principales fuentes de emisiones de N_2O en los sistemas agrícolas. De igual manera, Lal (2020) señala que un manejo inadecuado del nitrógeno incrementa las pérdidas de este nutriente hacia la atmósfera, reduciendo la eficiencia agronómica y aumentando el impacto ambiental de la producción agrícola. En este contexto, Smith et al. (2019) destacan que la optimización de la fertilización constituye una de las estrategias con mayor potencial para disminuir las emisiones del sector agropecuario sin comprometer la productividad.

Las prácticas de manejo identificadas en las unidades productivas reflejaron una elevada dependencia de insumos convencionales y una limitada adopción de prácticas orientadas a la mitigación del cambio climático. Esta situación coincide con los hallazgos de Chávez-Caiza y Burbano-Rodríguez (2021), quienes evidenciaron que los sistemas agrícolas convencionales presentan una mayor presión ambiental que los sistemas agroecológicos debido al uso intensivo de fertilizantes y combustibles fósiles. Asimismo, Calderón-Guevara et al. (2025) destacan que la transición hacia sistemas agrícolas sostenibles requiere fortalecer la gestión del carbono, promover prácticas conservacionistas e incentivar la adopción de tecnologías que reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero.

El potencial de reducción de la huella de carbono obtenido mediante la implementación de estrategias de mitigación confirma que la combinación de prácticas agronómicas sostenibles constituye una alternativa efectiva para disminuir las emisiones del sector agrícola. Entre las medidas con mayor impacto se encontraron la fertilización basada en análisis de

suelo, el fraccionamiento de las aplicaciones de nitrógeno y el riego intermitente en arroz. Estos resultados son consistentes con los planteamientos de Gutiérrez-León et al. (2023), quienes reportaron que la optimización del manejo de insumos representa una de las acciones más eficaces para reducir la huella de carbono en sistemas agropecuarios ecuatorianos. De manera complementaria, Cabezas-Andrade et al. (2024) demostraron que la incorporación de principios de economía circular y el aprovechamiento sostenible de los residuos agrícolas contribuyen significativamente a la disminución de las emisiones y al fortalecimiento de la sostenibilidad productiva.

Los resultados obtenidos aportan evidencia científica sobre la magnitud de la huella de carbono en los principales sistemas productivos agrícolas de la Zona 5 del Ecuador, proporcionando información que complementa las investigaciones desarrolladas en el país sobre sostenibilidad agrícola, acumulación de carbono y gestión ambiental (Ávila-Salem & Montesdeoca, 2024; Saltos Fernández & Flores De la Torre, 2024; Reyna-Bowen et al., 2026). En conjunto, estos estudios evidencian la necesidad de integrar criterios ambientales en la planificación agrícola, promoviendo sistemas productivos más resilientes y compatibles con los compromisos nacionales de mitigación del cambio climático.

La interpretación de los resultados debe realizarse considerando las limitaciones metodológicas del estudio. La estimación de la huella de carbono se efectuó mediante la aplicación de los factores de emisión de Nivel 1 (Tier 1) establecidos en el 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2019), debido a la ausencia de factores de emisión específicos para las condiciones agroecológicas del Ecuador. Asimismo, la cuantificación de las emisiones se fundamentó en información obtenida mediante encuestas estructuradas, registros de campo y datos proporcionados por los productores, sin incorporar mediciones directas de CO₂, CH₄ y N₂O bajo condiciones de campo. Adicionalmente, la investigación se circunscribió a los principales sistemas productivos agrícolas de la Zona 5 del Ecuador, por lo que los resultados representan las condiciones propias de esta región y su extrapolación a otras zonas agroecológicas del país

debe realizarse con cautela. En consecuencia, futuras investigaciones deberían desarrollar factores de emisión específicos para los sistemas agrícolas ecuatorianos, incorporar mediciones directas de gases de efecto invernadero y ampliar la evaluación hacia otras regiones del país, con el propósito de mejorar la precisión de las estimaciones y fortalecer la base científica para el diseño de estrategias nacionales de mitigación en el sector agrícola.

Conclusiones

Los sistemas productivos agrícolas evaluados presentaron diferencias significativas en la magnitud de su huella de carbono. El cultivo de arroz registró el mayor valor, con $4,12 \pm 0,23 \text{ t CO}_2\text{-eq ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$, seguido por banano, caña de azúcar y maíz, mientras que el cacao presentó la menor huella de carbono. Estas diferencias estuvieron relacionadas con la intensidad del manejo agronómico, el uso de insumos, la mecanización, el consumo energético y, en el caso del arroz, las emisiones derivadas de las condiciones de inundación.

La fertilización nitrogenada constituyó la principal fuente de emisiones de gases de efecto invernadero, con una participación del 38,0 % del total, seguida por el consumo de combustibles y el uso de maquinaria agrícola, que representaron el 21,1 %. Estos resultados evidencian que la gestión del nitrógeno y la eficiencia energética deben ser consideradas áreas prioritarias de intervención para reducir el impacto ambiental de los sistemas productivos de la Zona 5 del Ecuador.

Las prácticas de manejo implementadas por los productores mostraron una elevada dependencia de fertilizantes nitrogenados, maquinaria accionada por combustibles fósiles y sistemas de riego con consumo energético. Al mismo tiempo, se identificó una limitada adopción de prácticas sostenibles, como el compostaje, los cultivos de cobertura, el registro del consumo de combustible y el cálculo de la huella de carbono, lo que evidencia la necesidad de fortalecer los procesos de capacitación, asistencia técnica y gestión ambiental en las unidades productivas.

La evaluación de las estrategias de mitigación demostró que la fertilización basada en análisis de suelo presentó el mayor potencial individual de reducción de emisiones, con 11,8 %, seguida por el fraccionamiento del nitrógeno y el riego intermitente en arroz. La aplicación integrada de las prácticas evaluadas permitiría alcanzar una reducción potencial del 31,6 % de la huella de carbono, confirmando que la combinación de medidas agronómicas, energéticas y ambientales constituye una alternativa viable para mejorar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas analizados.

Los resultados obtenidos proporcionan evidencia científica que fortalece el conocimiento sobre el comportamiento de la huella de carbono en los principales sistemas productivos agrícolas de la Zona 5 del Ecuador y constituyen una referencia técnica para la formulación de políticas públicas, el diseño de programas de extensión agrícola y la implementación de estrategias de mitigación orientadas a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, esta investigación establece una línea base para futuras evaluaciones ambientales en el sector agropecuario ecuatoriano, favoreciendo el desarrollo de sistemas productivos más eficientes, resilientes y alineados con los objetivos nacionales de sostenibilidad y adaptación al cambio climático.

Referencias bibliográficas

- Andrade, H. J., Campo, O., & Segura, M. (2015). Huella de carbono del sistema de producción de arroz (*Oryza sativa*) en el municipio de Campoalegre, Huila, Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 15(1), 25–31. https://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num1_art:394
- Ávila-Salem, M. E., & Montesdeoca, F. (2024). Propiedades fisicoquímicas, biológicas y acumulación de carbono como indicadores de calidad en un suelo andino del Ecuador bajo labranza, fertilización nitrogenada y rotación de cultivos. *Siembra*, 11(Supl. 3).
- Bojacá, C. R., Wyckhuys, K. A. G., & Schrevens, E. (2014). Life cycle assessment of Colombian greenhouse tomato production based on farmer-level survey data. *Journal of Cleaner Production*, 69, 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.078>
- Cabezas-Andrade, D., Jiménez-Gutiérrez, M. Y., Torres-Castillo, R. M., & Bustamante KCuenca, J. C. (2024). Huella de carbono en residuos postcosecha de *Theobroma cacao* L. y la economía circular. *Agroecología Global*, 6(11), 4–20. <https://doi.org/10.35381/a.g.v6i11.4143>
- Calderón-Guevara, M. N., Carpio-Rivera, N. Y., & Galarza-Mora, W. G. (2025). Agricultura sostenible y sumideros de carbono en Ecuador: oportunidades de mitigación climática y acceso a los mercados de carbono. *MQRInvestigar*, 9(4). <https://doi.org/10.56048/MQR20225.9.4.2025.e1324>
- Chávez-Caiza, J. P., & Burbano-Rodríguez, R. T. (2021). Cambio climático y sistemas de producción agroecológico, orgánico y convencional en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo. *Letras Verdes*, 29, 149–166. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.29.2021.4751>
- Díaz Fonseca, O. D., & Lizarazo Ariza, J. A. (2016). Determinación de la huella hídrica del cultivo de algodón (*Gossypium*) en Natagaima, Tolima (Trabajo de grado, Universidad de La Salle).
- FAO, F. (2023). La situación de la mujer en los sistemas agroalimentarios 2023.
- Góngora, A. F., & Trujillo-González, J. M. (2025). Estado del arte de la huella hídrica agrícola en Colombia. *Ingeniería y Competitividad*, 27(2). <https://doi.org/10.25100/iyc.v27i2.14581>
- Gutiérrez-León, F. A., Briones Zavala, S. P., & Lastra-Bravo, X. B. (2024). Estimación de la huella hídrica de la ganadería de leche en la Sierra Centro Norte del Ecuador. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 40(2). <https://doi.org/10.29393/CHJAA40-31EEFX30031>
- Gutiérrez-León, F. A., Lastra-Bravo, X. B., & Cali Aguirre, V. A. (2023). Estimación de la huella de carbono de las ganaderías de leche de la zona andina del Ecuador. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 39(3), 305–318. <https://doi.org/10.29393/CHJAA39-27EH30027>
- IPCC. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Lal R. Materia orgánica del suelo y retención de agua . *Revista de Agronomía* . 2020 ; 112 : 3265–3277 . <https://doi.org/10.1002/agj2.20282>
- Latriglia Castro, L. X., & Vera Oyola, C. (2015). Captura de carbono en sistemas pastoriles establecidos en Colombia. *Revista Sistemas de Producción Agroecológicos*, 6(1), 89–113. <https://doi.org/10.22579/22484817.666>

- López Astudillo, A., Rodríguez, L. M., Lubo, C. M., Arenas, F., & Sierra, B. E. (2014). Comportamiento de la huella de carbono en los sectores de agricultura y energía, una revisión. *Sistemas & Telemática*, 12(31). <https://doi.org/10.18046/syt.v12i31.1914>
- Ortiz Caballero, L. D. (2014). Cálculo de la huella hídrica de los sistemas productivos agrícolas de la microcuenca Quebrada Cune, municipio de Villeta, Cundinamarca (Trabajo de grado, Universidad de La Salle).
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducción del impacto ambiental de los alimentos a través de productores y consumidores. *Science*, 360 (6392), 987-992. DOI: 10.1126/science.aag0216
- Reyna-Bowen, L., Klamerus-Iwan, A., & Delgado-Moreira, M. (2026). Twenty Years of Soil Organic Carbon Research in Ecuador: A Bibliometric and GIS-Based Assessment of Trends and Research Gaps. *Geomatics and Environmental Engineering*, 20(4). <https://doi.org/10.7494/geom.2026.20.4.91>
- Salto Fernández, N. B., & Flores De la Torre, J. L. (2024). Análisis de los recursos naturales y prácticas campesinas en ecosistemas de altura. Caso de estudio: comunidad Cochapata en Urcuquí-Ecuador. *Siembra*, 11(1). <https://doi.org/10.29166/siembra.v11i1.4486>
- Sierra Ramírez, E., Andrade, H. J., & Segura, M. (2024). Huella de carbono en sistemas de producción agropecuarios. Universidad del Tolima, Sello Editorial.
- Smith, P., Adams, J., Beerling, DJ, Beringer, T., Calvin, KV, Fuss, S., ... & Keesstra, S. (2019). Impactos de las opciones de eliminación de gases de efecto invernadero terrestres en los servicios ecosistémicos y los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas. *Annu. Rev. Environ. Resour*, 44 (1), 1-32.
- Tovar-Hernández, N. A., Trujillo-González, J. M., Muñoz-Yáñez, S. I., Torres-Mora, M. A., & Zárate, E. (2017). Evaluación de la sostenibilidad de los cultivos de arroz y palma de aceite en la cuenca del río Guayuriba mediante huella hídrica. *Orinoquia*, 21(1), 52–63. <https://doi.org/10.22579/20112629.394>
- Vargas-Pineda, O. I., Trujillo-González, J. M., & Torres-Mora, M. A. (2020). Supply–demand of water resource of a basin with high anthropic pressure: Case study Quenane–Quenanito Basin in Colombia. *Air, Soil and Water Research*, 13. <https://doi.org/10.1177/1178622120917725>
-