

Estimación de la Huella de Carbono en Cultivos Arroceros del Distrito de Riego ASOZULIA, Norte de Santander, Mediante la Aplicación del Análisis de Ciclo de Vida

Estimation of the Carbon Footprint in Rice Crops in the ASOZULIA Irrigation District, Norte de Santander, Through the Application of Life Cycle Analysis

Recibido: 22 de julio de 2022

Aprobado: 28 de noviembre de 2022

Formadecitar: J. Melgarejo-Castañeda, F.R. Arencibia-Pardo, B. Peña-Rodríguez, "Estimación de la Huella de Carbono en Cultivos Arroceros del Distrito de Riego ASOZULIA, Norte de Santander, Mediante la Aplicación del Análisis de Ciclo de Vida", *Mundo Fesc*, vol 13, no. 26, pp. 7-23 de 2023. <https://doi.org/10.61799/2216-0388.1315>

Johneder Melgarejo Castañeda* 

Magister en Ingeniería Industrial
jmelgarejo@sena.edu.co
Universidad de Pamplona
Pamplona, Colombia.

Francisco Raúl Arencibia Pardo 

Magister en Ingeniería Industrial
francisco.arencibia@unipamplona.edu.co
Universidad de Pamplona
Pamplona, Colombia.

Belisario Peña Rodríguez 

Magister en Administración
belisariop@unipamplona.edu.co
Universidad de Pamplona
Pamplona, Colombia.

***Autor para correspondencia:**

jmelgarejo@sena.edu.co



Estimación de la Huella de Carbono en Cultivos Arroceros del Distrito de Riego ASOZULIA, Norte de Santander, Mediante la Aplicación del Análisis de Ciclo de Vida

Resumen

El presente estudio busca estimar la huella de carbono en arrozales del distrito de riego Asozulia. cultivos arroceros ubicados dentro del distrito de riego asozulia, Norte de Santander, Colombia, mediante una investigación descriptiva que emplea como referente metodológico el Análisis del Ciclo de Vida establecido en las normas internacionales ISO 14040 e ISO 14044. En primera instancia, se divide el sistema de producción en tres segmentos (bloques de estudio) para recopilar información primaria de los balances de masa y energía que allí intervienen, posteriormente, se construye el inventario de las emisiones de CO₂ empleando la base de datos Ecoinvent 3.1, los datos del inventario son procesados a través del software LCA-Manager para cuantificar el impacto en dicha huella, que se genera en cada uno de los bloques de estudio. Dentro de los resultados, se encontró que por cada hectárea de Cultivo el sistema emite 7.316 Kg CO₂ eq y que los factores con mayor incidencia en su orden son riego, urea, fertilizantes, quema de material vegetal, combustibles, agroquímicos, semilla, maquinaria agrícola y lubricantes. Finalmente, se proponen las siguientes estrategias como alternativas para reducir la huella de carbono: aplicación de tecnologías de agricultura de precisión, nivelación asistida por rayos láser para pendientes cero, modernización del parque de maquinaria agrícola, técnica de trasplante mecanizado, prácticas agronómicas favorables para recuperar el suelo, eliminación de quemas, plan de mantenimiento preventivo y predictivo y plan de capacitación para el personal.

Palabras clave: Arroz, Análisis del ciclo de vida, Impacto ambiental, Huella de carbono

Estimation of the Carbon Footprint in Rice Crops in the ASOZULIA Irrigation District, Norte de Santander, Through the Application of Life Cycle Analysis

Abstract

The present study carries out an estimate of the carbon footprint in the rice crops located within the Irrigation Ringy district, Santander Norte, Colombia, through descriptive research that uses as a methodological reference The analysis of the life cycle established in international standards ISO 14040 and ISO 14044. In the first instance, the production system is divided into three segments (studies of study) to collect primary information of the balance sheets of mass and energy that there are intervened, subsequently, the inventory of CO₂ emissions is built using the Ecoinvent database 3.1, the inventory data is processed through the LCA-Manager software to quantify the impact on the carbon footprint generated in each of the study blocks. Within the results, it was found that for each hectare of culture the system issues 7,316 KG CO₂ EQ and that the factors with the highest incidence in its order are watering, urea, fertilizers, burning of vegetable material, fuels, agrochemicals, seed, agricultural machinery, and lubricants. Finally, the following strategies are proposed as alternatives to reduce carbon footprint: implementation of precision agriculture technologies, laser bearing leveling for zero earrings, modernization of agricultural machinery park, machining transplant technique, favorable agronomic practices to recover the soil, disposal of burns, preventive maintenance and predictive plan and training plan for staff. Keywords: rice, life cycle analysis, environmental impact, carbon footprint

Keywords: Rice, Life cycle analysis, Environmental impact, Carbon footprint

Introducción

En el año 2015 se estableció la agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), debido a las alteraciones que ha presentado el planeta tierra y a la identificación de riesgos que amenazan la supervivencia de la humanidad, lo que se convirtió en lineamiento fundamental de la política pública de las naciones desde sus planes de desarrollo [1].

Posteriormente en el año 2019, durante la COP25 o cumbre del cambio climático, mediante el informe “el cambio climático y la tierra” se manifiesta la preocupación mundial respecto al impacto negativo generado en el medio ambiente por actividades agropecuarias, específicamente en lo referente al calentamiento global, estimándose un aporte del 23% de los gases de efecto de invernadero del total de las emisiones. El calentamiento global afecta la productividad agrícola, reduce la disponibilidad de alimentos causando hambruna y modificaciones en las dietas nutricionales; por otro lado, ocasiona fuertes fenómenos naturales y proliferación de enfermedades [2].

La dinámica mundial de las economías exige a las organizaciones buscar continuamente oportunidades de mejora en sus procesos, esto con el fin de ser competitivas en el mercado y garantizar su sostenibilidad en el tiempo, por este motivo, las empresas deben implementar estrategias tendientes a disminuir costos, aumentar la productividad y aprovechar al máximo los recursos. Sectores productivos como el agropecuario y específicamente el arrocero, requieren de investigaciones que le suministren este tipo de herramientas para hacerlo más productivo y competitivo.

El arroz (*Oryza sativa* L.) debido al aporte nutricional que realiza, es uno de los cereales de mayor importancia gastronómica, siendo un alimento básico para el consumo de gran parte de la población [3]. además, para Colombia, el arroz merece un capítulo especial por el alto impacto que tiene sobre la economía, la generación de empleo y el consumo per cápita [4].

La producción agrícola del arroz se ha visto afectada por el comportamiento decreciente de la productividad e incremento de costos, que con el pasar de los años, han hecho menos competitiva dicha actividad, por ende, la reconversión a otros cultivos, algunas veces ilícitos o el abandono de la actividad por parte de los propietarios de estas tierras. Las prácticas inadecuadas dentro del proceso han empobrecido el suelo y afectado su estructura, adicional a ello, conllevan a incrementar la fertilización y el uso de agroquímicos en el propósito de controlar las plagas y enfermedades del arroz, así como el excesivo consumo de agua en el regadío de dicho cultivo. Lo que a su vez provoca impacto negativo al medio ambiente y en especial a la categoría del calentamiento global [5].

El Distrito de Adecuación de tierras de gran escala del Rio Zulia fue construido en los inicios de la década de los 70 por el HIMAT, hoy IDEAM e INAT, las áreas de influencia

corresponden a los municipios de San José de Cúcuta y El Zulia, comprende un área de 45.494 hectáreas, de las cuales, el 43,7 % (19.867 hectáreas) cuenta con tierras aptas para la implementación de cultivos agrícolas. Actualmente, 15.857 hectáreas son irrigadas mediante la infraestructura del distrito, las cuales corresponden a cerca de 1.340 predios, en ellos, se encuentran cultivos de cacao, palma de aceite y especialmente arroz, este último corresponde al 80% de la producción [6].

Por otro lado, el conjunto de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que se derivan una actividad de producción o consumo representan su huella de carbono. Dentro del conjunto de estos mencionados GEI el que más contribuye al calentamiento global corresponde a las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) [7]. El arroz constituye un alimento tradicional e indispensable para la alimentación de los colombianos gracias al aporte nutricional y en especial de los carbohidratos, además de ser económicamente accesible a toda la población. Con un consumo per cápita que asciende a 43,2kg, el arroz es uno de los productos que mayor consumen los colombianos [8].

En este sentido, incentivar el aumento de la producción nacional de arroz es un componente clave de la seguridad alimentaria que contribuye a su vez a impulsar el crecimiento económico del país. No obstante, es necesario que este propósito se lleve a cabo con proyectos integrales que incluyan el componente de sostenibilidad.

Con la presente investigación se pretende especialmente estimar la huella de Carbono en cultivos arroceros del distrito de riego Asozulia, Norte de Santander, mediante la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida, buscando generar un insumo clave que sirva de modelo para implementarlo en otras organizaciones y desarrollar acciones que fortalezcan el sector arrocerero y así garantizar su sostenibilidad, así como la calidad de vida de los agricultores.

Queda claro, que se requieren implementar acciones para mitigar los impactos negativos que genera el sector agrícola sobre el ambiente, debido a las inoportunas prácticas de producción, en este sentido, el termino Análisis del Ciclo de Vida (ACV) cobra relevancia y se muestra como un camino importante para cumplir dicho objetivo.

Es necesario aplicar una metodología clara y completa, que resulte útil en función de plantear un ACV para recopilar la información pertinente y generar los cálculos que conduzcan a obtener los objetivos establecidos, por ello las normas ISO 14040 y 14044 [5], desarrollan un papel importante, ya que proporcionan la guía optima que ayuda a describir todas las fases que intervienen en la actividad (desde la extracción hasta el uso final que tenga dicho producto).

El ACV mediante las herramientas Ecoinvent y el software LCManager permite identificar los elementos que más inciden en la huella de carbono durante el cultivo del arroz. La identificación de factores que impactan negativamente al ambiente permite formular e implementar estrategias fundamentadas en métodos de trabajo o técnicas de producción que, minimizarán el impacto generado.

La actual investigación, mediante el método ACV logró identificar el impacto ambiental en relación con la huella de carbono que se genera por los cultivos arroceros del distrito de Riego Asozulia Norte de Santander, Colombia, en cada una de las fases del cultivo: preparación del terreno, siembra, recolección de la cosecha y almacenamiento del grano.

Materiales y Métodos

El presente trabajo se desarrolló aplicando la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) en las etapas principales del proceso de cultivo de arroz (preparación de terreno, siembra, crecimiento, desarrollo, cosecha y almacenamiento del grano de arroz paddy), tomando como unidad funcional una hectárea cultivada y como límite del sistema, todas las áreas destinadas para el cultivo de arroz, en la zona del distrito de riego Asozulia, Norte de Santander.

Dicha metodología consistió en construir los flujos de entradas y salidas para las etapas del proceso por unidad funcional (1 hectárea), organizando así, un balance de masas con datos comerciales de todas las materias primas e insumos que intervienen allí; a continuación se elaboró el inventario de emisiones empleando la base de datos Ecoinvent v3.1, el cual, se convierte en el insumo necesario para evaluar el impacto ambiental del proceso, cuyo indicador es la huella de carbono, que para el estudio se establece como kilogramos de CO₂ equivalente por hectárea cultivada. Se puede entonces definir el presente estudio como una investigación descriptiva en la cual el investigador busca describir el contexto bajo investigación, para cubrir los objetivos e intereses de una población en concreto.

Aplicando este método se pretende determinar propiedades, características y perfiles de personas, grupos, comunidades o cualquier fenómeno que se someta a análisis, midiendo y recogiendo información de manera independiente o conjunta sobre las variables mostrando con precisión las dimensiones de los sucesos en la comunidad, contexto o situación [9].

En cuanto a la población determinada en esta investigación, son los elementos de los que se va a obtener información, y estarán bien definidos en el tiempo y en el espacio, de forma que, ante la presencia de un potencial integrante de la misma, pueda decidirse su inclusión o no en la población estudiada [10].

En línea con lo establecido por [11], en relación con la definición del instrumento y de los datos que se requieren conseguir en el estudio, se utilizó el Software LCA Manager 1.3, y se empleó la información de la base de datos de Ecoinvent V3.1 y los datos recolectados desde la fuente primaria durante las etapas del cultivo del arroz, es decir, preparación del terreno, siembra de la semilla, germinación, macollamiento, embuchamiento, espigamiento, cosecha, transporte y almacenamiento del grano.

En la siguiente figura 1 y 2 se hace una representación de los instrumentos empleados

para la recolección de la información.



Figura 1. Instrumentos de recolección de información empleados.

La ase de datos Ecoinvent permitió definir los inventarios en las etapas de los procesos y el programa informático LCA Manager 1.3 fue empleado para identificar y cuantificar los impactos ambientales. A su vez, esta investigación, implementó el LCA Manager, herramienta informática que mide el perfil ambiental de los productos y procesos industriales empleando el enfoque de Análisis de Ciclo de Vida especificado en las series de normas ISO-14040/44 [12], en donde se analizaron todas las fases del ciclo de vida del producto. En cuanto a la ilustración siguiente, describe en general la metodología que se aplicó en la investigación:



Figura 2. Metodología de la investigación

Resultados y discusión

Se identificaron los flujos de masa y energía que intervienen en el proceso del cultivo de arroz empleando el método de muestreo por bloques acorde a los límites y la unidad funcional (1 hectárea de cultivo de arroz), fraccionando el sistema en tres bloques de

estudio que representan las etapas del proceso: 1) Preparación del terreno y siembra 2) Crecimiento y desarrollo del cultivo y 3) Cosecha y almacenamiento del grano paddy. A continuación, se presentan los balances de masas para cada uno de los bloques de estudios: La tabla I corresponde a la etapa de preparación del terreno y siembra, el balance del bloque II, correspondiente a la etapa de crecimiento y desarrollo del cultivo se presenta en la tabla II y en la tabla III se relaciona el balance correspondiente a la recolección de cosecha y almacenamiento del grano.

Tabla I. Balance de masas para el bloque 1 del estudio (preparación del terreno y siembra de la semilla)

Entradas	Und	Und/ha
Urea al 46%	kg.	75.00
Fosfato <u>diamónico</u> (DAP) 18-46-0	kg.	132.00
Cal de dolomita	kg.	285.00
LINAP 90 Micro emulsionable	l.	0.10
Bolero	l.	0.98
Glifosato VECOL	l.	3.00
GOAL 480	l.	0.12
<u>Ronstar Evolution</u>	l.	2.00
<u>Prowl 400 EC</u>	l.	0.45
Combustible Diesel	l.	111.30
Gasolina	l.	29.10
Aceite 20W 50	l.	0.03
Aceite hidráulico 10W	l.	0.15
Grasa <u>semilubricante</u> de litio	kg.	0.40
Grasa valvulina 80W90	kg.	1.09
Agua de riego	m³	8245.00
Quema de material vegetal	Tn.	5.00
Semilla de arroz	kg.	180.00
Llantas de tractor (55 kg)	kg.	0.18
Tractor	kg.	0.46

Fuente: Entrevistas y reportes de producción suministrados por productores del Distrito de Riego Asozulia (2020 – 2021).

Tabla II. Balance de masas para el bloque 2 del estudio (crecimiento y desarrollo del cultivo)

Entradas	Und	Und/ha
Urea al 46%	kg.	150.00
Fosfato <u>diamónico</u> (DAP) 18-46-0	kg.	50.00
Arrocero Fertilizante	kg.	50.00
Cloruro de Potasio al 60%	kg.	150.00
<u>Crezinc – P</u>	l.	1.00
AGRISPON SL	l.	0.30
<u>Cosmo ind</u>	l.	0.51
<u>Cosmo Aguas</u>	l.	0.20
Propanil (<u>Stam M4</u>)	l.	5.00
<u>Stadium</u>	l.	1.00
Aura (<u>agromilenio</u>)	l.	1.00
<u>Dash</u> (viene con el aura) - Concentrado emulsionable (EC)	l.	0.70
<u>Facet SC</u>	l.	2.30
Amina 720	l.	0.40
<u>Biofermext</u> (microorganismo)	l.	2.30
VOLIAM FLEXI	l.	0.45
RAUS	l.	0.45
Combustible DIESEL	l.	36.00
Gasolina	l.	10.00
Agua de riego	m³	10,098

Fuente: Entrevistas y reportes de producción suministrados por productores del Distrito de Riego Asozulia (2020 – 2021).

Tabla II. Balance de masas para el Bloque 3 (Recolección de Cosecha y almacenamiento final del grano)

Entradas	Und	Und/ha
Combustible Diesel	l.	96.20
Gasolina	l.	9.00
Aceite 20W 50	l.	0.02
Aceite hidráulico 10W	l.	0.10
Grasa <u>semilubrificante</u> de litio	kg	0.37
Aceite lubricante Terpel ULTREK 50 <u>Monógrado</u> API CF/SF	l.	0.20
Transporte de carga al molino	Tn/km	0.20
Llantas de Tractor (55 <u>kgs</u>)	kg.	0.14

Fuente: Entrevistas y reportes de producción suministrados por productores del Distrito de Riego Asozulia (2020 – 2021).

El segundo resultado, corresponde a la identificación y cuantificación del impacto ambiental, como se mencionó en la metodología, fue seleccionado dentro de la categoría de calentamiento global (CG) el indicador HdC, una vez que se obtienen los balances de masas, se construye el inventario de emisiones de GEI por cada uno de los factores contaminantes del cultivo de arroz.

El inventario de emisiones de GEI para el objeto de estudio se construyó empleando la base de datos Ecoinvent versión 3.1, la cual, recopila información de infinidad de estudios de impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida de productos y procesos, analizando, además, consumo energético, transporte, extracción de materia prima, desechos, etc., es decir, es una fuente de información secundaria, de alta confiabilidad.

Por último, se modelan los datos extraídos del inventario con el balance de masas para caracterizar el impacto ambiental en cada etapa del proceso de cultivo de arroz, obteniendo así, la estimación de la HdC por hectárea para los cultivos arroceros del distrito de riego Asozulia mediante la metodología Análisis del Ciclo de Vida (ACV) establecido en las normas ISO 14040-14044 [12] y con la herramienta informática LCA Manager 1.3. En las gráficas 1, 2 y 3 se presentan los factores contaminantes y las emisiones de kg. CO₂ equivalente por hectárea de cultivo para cada uno de los bloques de estudios que se relacionaron en las tablas 1, 2 y 3 respectivamente.

Los factores contaminantes del proceso por bloques de estudios con mayor incidencia en la huella de carbono del proceso son: a) Bloque 1: riego, urea, quema del material vegetal, fertilizante de fosfato diamónico, Diesel y semilla. b) Bloque 2: riego, Urea, fosfato diamónico, cloruro de potasio, compuesto de acetamida-anilida, nitrato amónico y Diesel principalmente. c) Bloque 3: el Diesel, la gasolina y el desgaste de la maquinaria agrícola principalmente.

A continuación, en las figuras 3, 4 y 5 se presentan las emisiones dadas en kg de CO₂ equivalente por ha. de cultivo para cada uno de los bloques de estudio y por factor contaminante identificado dentro del proceso. A su vez, estos valores se convierten en insumo clave para la elaboración de propuestas de mitigación del impacto o para las

recomendaciones del estudio.

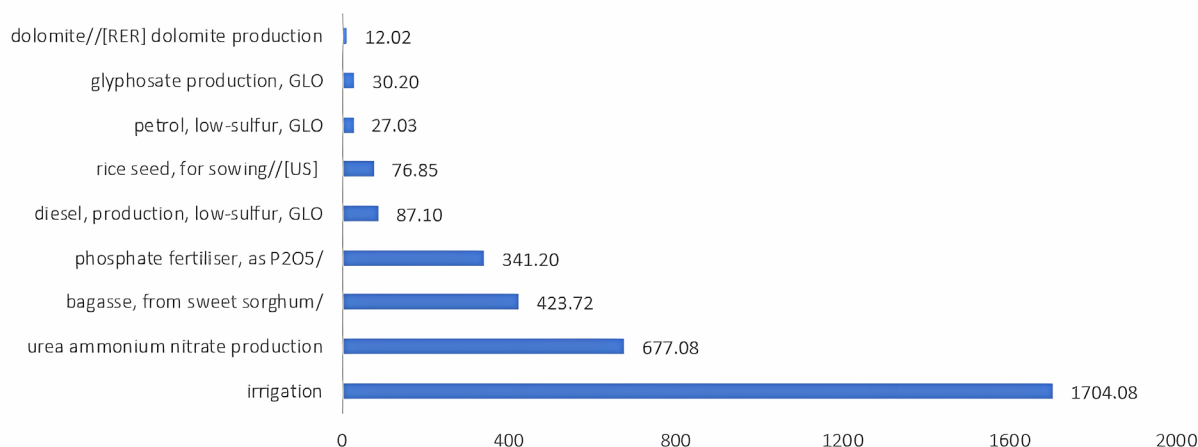


Figura 3. Emisiones de kg de CO2 equivalente del bloque 1 (preparación del terreno y siembra) por hectárea del cultivo

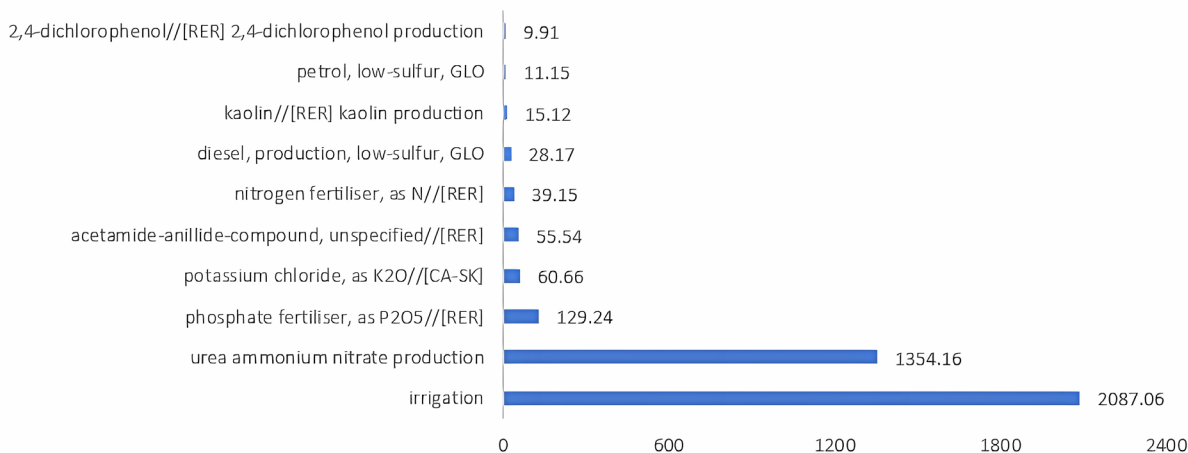


Figura 4. Emisiones de kg de CO2 equivalente del bloque 2 (crecimiento y desarrollo del cultivo) por hectárea del cultivo

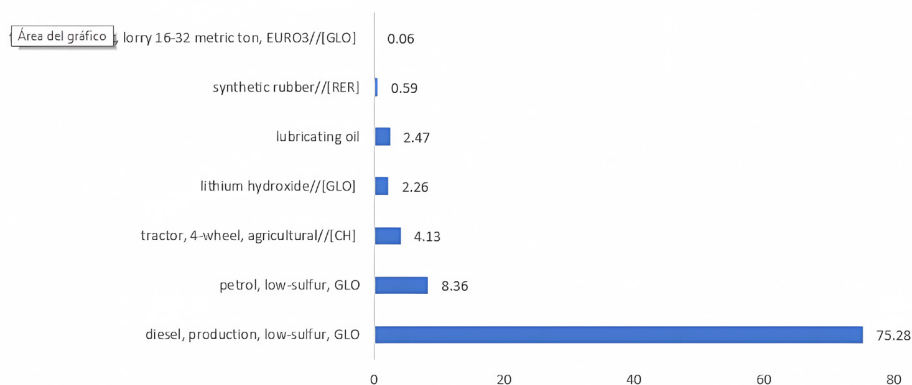


Figura 5. Emisiones de kg de CO2 equivalente del bloque 3 (recolección de cosecha y almacenamiento) por ha del cultivo

Una vez consolidados los impactos de los tres bloques de estudio, se determinaron los factores que mayor inciden en las emisiones de CO2 para la producción de arroz paddy verde (ver gráfica 4), que en su orden son: riego, urea, fertilizantes, quema de material vegetal, combustibles, agroquímicos, semilla, maquinaria agrícola y lubricantes (ver figura 6).

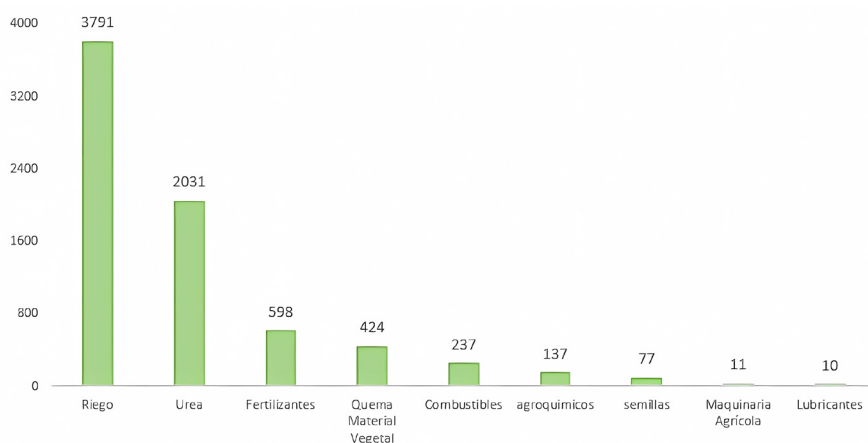


Figura 6. Emisiones totales de kg de CO2 equivalente por hectárea del cultivo de arroz

Igualmente, se presenta un resumen del impacto generado en cada uno de los bloques de estudio o etapas del proceso, obteniendo valores similares y muy significativos, principalmente en las dos primeras etapas del proceso (ver tabla IV).

Tabla IV. Emisiones de kg de CO₂ equivalente por hectárea del cultivo de arroz en cada uno de los bloques de estudio

Etapas del proceso	kg CO ₂ eq.	% de incidencia
Bloque 1 - Preparación del terreno y siembra	3410,8	47%
Bloque 2 - Crecimiento y desarrollo del cultivo	3811,9	52%
Bloque 3 - Cosecha y almacenamiento	93,16	1%
Total - Cultivo y Cosecha del arroz (1 ha)	7315,87	100%

De acuerdo a la tabla 4, el bloque 1 que corresponde a la preparación del terreno y siembra emite el 47% de todo el CO₂ del proceso, mientras que el bloque 2 del crecimiento y desarrollo del cultivo genera el 52%, siendo el más contaminante, aunque el bloque 3 para la cosecha y almacenamiento solo produce el 1% de las emisiones. Estos resultados dejan ver que la necesidad de emprender acciones para reducir el impacto ambiental que genera el bloque 1 y 2 para reducir las emisiones de esta actividad agrícola.

Discusión

Se realizó un análisis de los resultados en contraste con la revisión bibliográfica sobre de la estimación de HdC en cada una de las etapas del cultivo de arroz y se pudieron identificar cuatro (4) grupos de factores contaminantes que deben ser intervenidos para lograr una reducción significativa en la HdC. A continuación, se describe cada uno de ellos:

G1. Se identificaron suelos con pendientes pronunciadas que aumentan la circulación del agua y el consumo mismo. Por otro lado, la inundación del terreno ocasiona transformaciones en el suelo que influyen en la emisión de GEI, además, por los procesos fisicoquímicos que allí se producen. El principal recurso empleado para la producción de arroz paddy es el agua (18.343 m³/ha) y esta situación más la expansión continua del área agrícola ha incrementado la demanda del líquido hasta niveles cercanos a los 14 m³/s, siendo el mismo caudal que tiene en época de verano el río Zulia [6], lo cual pone en alto riesgo la sostenibilidad del cultivo.

G2. Alta densidad de semillas por área de cultivo debido a que se emplea la técnica de siembra al voleo, la cual, es realizada al azar y no garantiza una distribución uniforme, lo cual, sumado al método de preparación en fangueo o inundación genera un ambiente favorable para el crecimiento de malezas, lo que aumenta la competencia por los nutrientes, siendo una situación que repercute en el consumo excesivo de semillas y en el aumento de la aplicación de fertilizantes y herbicidas en la etapa inicial del cultivo.

G3. Se observa afectación en la estructura de los suelos causada por malas prácticas en la preparación del suelo y uso inadecuado de la mecanización agrícola. La preparación del suelo genera la pérdida de la estructura, impidiendo que se formen espacios (porosidad) para la contención de agua y aire necesario para las raíces. Además, se forman costras

en la superficie que no permiten retener el agua. Por otro lado, la maquinaria agrícola favorece la compactación, teniendo como resultado la muerte de las raíces, debido a que, por debajo del suelo se forman capas duras que no permiten su crecimiento y expansión, generando dificultades al momento de la adsorción de los fertilizantes y agua, así como para el anclaje de las plantas, lo que produce volcamiento.

G4. Maquinaria con tecnologías obsoletas y procesos de combustión deficientes. Ausencia de planes de mantenimiento preventivo y predictivo en el parque automotor y de maquinaria agrícola. Esta situación ocasiona afectaciones en la estructura del suelo, pero, además, está demandando mayor consumo de combustible, mayor tiempo de mecanizado y menor efectividad en las tareas programadas. Adicional a ello, ocasiona mayor rotación de repuestos y lubricantes y paradas del proceso.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realiza un análisis comparativo con la literatura reciente sobre la dinámica que existe entre la producción de arroz y la huella de carbono. A partir de esto, se encuentra que el cultivo de arroz ha sido reconocido como uno de los más esenciales a nivel mundial, con un consumo per cápita significativo [13]. Sin embargo, la producción de arroz está asociada con una generación considerable de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero, tal como señala [13]. Este cultivo, aunque es fundamental para la alimentación de una gran parte de la población, está estrechamente relacionado con estas emisiones a través de su cadena de producción, desde el proceso agrícola hasta la comercialización.

Por este motivo, los resultados del estudio concuerdan en que estos procesos contribuyen de manera significativa a la emisión de GEI, como lo señala el observatorio Agrocadenas de Colombia y el análisis realizado por [14]. Aunque los métodos empleados para medir la huella de carbono han evolucionado desde la década de 1970, actualmente, se cuenta con herramientas avanzadas como el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) [12] que permite obtener información confiable para valorar la problemática, tal como se aplicó en el estudio del Distrito del Río Zulia en Colombia, lo cual, permite caracterizar que hay emisiones significativas y determinar las etapas donde más se genera contaminación y afectaciones al medio ambiente.

De esta manera, se puede decir que el cambio climático y sus consecuencias, como el aumento de temperaturas, la disminución de precipitaciones y la variabilidad climática, representan un desafío adicional para la producción agrícola en esta región, tal como lo señala la CEPAL y la FAO. De forma similar, el impacto del cambio climático en diferentes cultivos, proyectado por la NASA, indica cambios importantes en los rendimientos, debido a las alteraciones climáticas y las altas emisiones de GEI [15].

En concordancia con GreenFacts [16] existe una relación simbiótica entre la agricultura y el cambio climático que genera preocupaciones importantes, ya que las emisiones provenientes de actividades agrícolas contribuyen al calentamiento global y, a su vez, el cambio climático afecta adversamente a la agricultura. Esta interacción perjudicial se

evidencia tanto en el rendimiento de los cultivos, como en la economía y la seguridad alimentaria.

Por lo tanto, los resultados concuerdan con otros estudios [15] y [17], donde se destaca que, aunque el arroz es un pilar fundamental en la dieta y economía de diversas regiones, su producción tiene un impacto significativo en la emisión CO₂, siendo importante la implementación de métodos como el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) y la medición de la Huella de Carbono (HdC) como pasos importantes para comprender y mitigar este impacto ambiental. Además, con línea con estas investigaciones, se plantea la necesidad de reducir el efecto negativo de la producción del arroz y abogar por prácticas más sostenibles en la agricultura.

Por último, se entiende que la producción de arroz es fundamental para la alimentación mundial, pero no está exenta de generar altas emisiones de GEI, lo que contribuye a su vez al cambio climático que perjudica la oferta alimentaria global [18]. De esta forma, la comprensión de la huella de carbono y el análisis detallado de los procesos agrícolas se deben seguir investigando para tomar medidas que mitiguen este impacto ambiental y promuevan prácticas más sostenibles en la producción de alimentos.

Conclusiones

Mediante el método de muestreo por bloques se evaluaron los flujos de masa que intervienen en el cultivo y cosecha de arroz para 1 hectárea de producción. En promedio, una hectárea de tierra produce 5,6 toneladas de arroz paddy verde y este equivale a 3.327 kg de arroz blanco comercial. Por ello, la investigación desarrollada tendrá un aporte significativo debido a la cantidad de producción que se involucra en la unidad funcional del estudio, además del impacto sobre la población objeto de estudio.

En términos de contaminación ambiental, el aporte de huella de carbono corresponde a la emisión de 7.316 kg de CO₂ equivalentes por hectárea cultivada, donde, el 52% corresponde al crecimiento y desarrollo del cultivo, el 47% la preparación del terreno y siembra y el 1% a la recolección de la cosecha y almacenamiento final del grano. Se estima entonces, que, en Norte de Santander, el cultivo de arroz puede emitir 190.000 Kg de CO₂ equivalente por cada año de producción, teniendo en cuenta que se realizan dos ciclos productivos al año, algo que sin duda preocupa.

Teniendo en cuenta la identificación de los factores contaminantes, la difícil situación que presenta el riego del cultivo y los altos costos de producción que hacen menos competitivo el producto en el mercado, se lograron formular estrategias que pretenden impactar positivamente al proceso con mayor eficiencia de los recursos y, por ende, reducción en la huella de carbono.

Una producción de arroz sostenible en el tiempo garantiza mayor disponibilidad de alimentos, lo cual, servirá para combatir el hambre y la pobreza. Igualmente, la mitigación

del calentamiento global en la actividad arroceras es un aporte significativo para la salud humana, que tendrá mejores condiciones de vida con menores riesgos en el ambiente.

Frente a lo anterior, es importante considerar que Norte de Santander reúne cerca de 1.600 unidades de producción, equivalente a 12.900 hectáreas, sobre las cuales se desarrolla la mayor actividad agrícola del departamento, impactando en la generación de empleo y la dinámica económica del área metropolitana de Cúcuta, motivo por el cual, se debe aunar esfuerzos interinstitucionales (alcaldías, gobernación, ministerio de agricultura, universidades, SENA, fedearroz, Corponor, Banco Agrario, entre otros), con el propósito de formular propuestas y gestionar recursos de inversión pública para la financiación e implementación de proyectos que permitan minimizar los factores que mayor inciden en el impacto ambiental.

Es necesario promover la implementación de prácticas agronómicas favorables como la rotación de cultivos, aprovechamiento de residuos orgánicos, aplicación de microorganismos eficientes y eliminación de quemados con el propósito de conservar los recursos naturales y la estructura del suelo. Se considera necesario, el desarrollo de investigaciones sobre estudios de factibilidad para la transformación de los desechos orgánicos que se generan en la zona y que pueden ser incorporados en el suelo para compensar las deficiencias que este presenta.

La falta de precisión durante el proceso de riego, siembra, cultivo y cosecha de arroz es uno de los factores que además de ocasionar altos costos, también incide en la generación de gases de efecto invernadero, haciendo menos competitiva y productiva la actividad y, por lo tanto, poniendo en riesgo la sostenibilidad de este. Es importante entonces, la implementación de tecnologías modernas como, por ejemplo, nivelación de precisión con rayos láser, sembradoras de precisión, cosechadoras inteligentes, tecnología satelital para estudiar las áreas de cultivo, vehículos aéreos no tripulados y el uso de software para capturar y procesar información que permita la toma de decisiones acertadas.

Es necesario, que, de la mano de las universidades y centros de investigación, se comiencen a realizar estudios que permitan la construcción de un plan para la modernización y automatización del cultivo y cosecha de arroz, mediante la incorporación de maquinaria, equipos y tecnologías avanzadas que tengan como resultado una mayor precisión en la aplicación de insumos y mejor rendimiento de la producción por hectárea.

Uno de los factores más contaminantes del proceso, tiene que ver con la técnica de siembra empleada, motivo por el cual, apoyados en una adquisición de maquinaria y tecnología más moderna, se necesita cambiar a la técnica de trasplante mecanizado, con el cual, se obtienen beneficios para la productividad del arroz y la disminución de contaminantes en el proceso.

Otro aspecto que se identificó en las zonas de producción, es la falta de capacitación del personal que labora en los cultivos de arroz, por tal motivo, las alianzas con el SENA

y las universidades de la región resultan necesarias para capacitar a la mano de obra calificada y los extensionistas rurales, especialmente en lo que corresponde a maquinaria agrícola, trabajos mecanizados, preparación de suelos, control de plagas, fertilización, producción agroecológica, instalación y mantenimiento de sistemas de riego, así como, extensión rural, manejo de agroquímicos, manejo de residuos peligrosos, entre otros temas de interés.

Referencias

- [1] Organización de las Naciones Unidas, Objetivos de desarrollo sostenible. Diciembre de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/#:~:text=Los%20Objetivos%20de%20desarrollo%20sostenible%20son%20el%20plan%20maestro%20para,la%20paz%20y%20la%20justicia>
- [2] Grupo de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible, ¿Qué es el COP25? Diciembre de 2019. [En línea]. Disponible en: <https://unsdg.un.org/es/latest/blog/que-es-la-cop25>
- [3] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO. La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050. Octubre de 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf
- [4] Cooperativa Agropecuaria del Norte de Norte de Santander - Croagonorte. El arroz. Enero de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://arrozcoagronorte.wordpress.com/coagronorte/>
- [5] H. Andrade, O. Campo y M. Segura, "Huella de carbono del sistema de producción de arroz (*Oryza sativa*) en el municipio de Campoalegre, Huila, Colombia", *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, vol. 15, no. 1, pp. 25-31, Junio 2014
- [6] Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Producción del Distrito de Riego del Zulia no debe girar en torno al arroz. Junio de 2018. [En línea]. Disponible en: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Ofhy7nydO34J:https://igac.gov.co/es/noticias/produccion-del-distrito-de-riego-del-zulia-no-debe-girar-en-torno-al-arroz-director-del&hl=es&gl=co&client=safari>
- [7] C. Beltran y C. Oliveros. Caracterización de la problemática en la sostenibilidad de la cadena de arroz en Colombia. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá, Colombia, 2020

- [8] Asociación Nacional de Industriales – ANDI, Política comercial para el arroz. Diciembre de 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.andi.com.co/Uploads/Archivo%20final%20ANDI.pdf>
- [9] R. Hernández, C. Fernández y M. Baptista. Metodología de la investigación. México: Mc Graw Hill, 2010
- [10] G. Carrasco. Muestreo de poblaciones. Diciembre de 2011. [En línea]. Disponible en: http://recursostic.educacion.es/descartes/web/materiales_didacticos/muestreo_poblaciones_ccg/conceptos_basicos.htm
- [11] R. Hernández, C. Fernández y M. Baptista. Metodología de la investigación. México: Mc Graw Hill, 2014
- [12] Organización Internacional de Normalización, ISO 14040:2006, Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia. Diciembre de 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- [13] C. Alsina, "Geometría y realidad", *Sigma*, vol. 33, pp.165-179, 2008
- [14] F. Zapata, N. Cano y J. Villa, "Art and Geometry of Plants: Experience in Mathematical Modelling through Projects", *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, vol. 14, no. 2, pp. 585-603, 2017
- [15] E. Gray. Un estudio de la NASA predice impactos del cambio climático global en los cultivos en 10 años. Noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.nasa.gov/feature/esnt/2021/un-estudio-de-la-nasa-predice-impactos-del-cambio-climatico-global-en-los-cultivos-en-10-a>
- [16] Green Facts. ¿Cómo perjudica el cambio climático a la agricultura? Julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.greenfacts.org/es/agricultura-desarrollo/l-2/4-amenaza-cambio-climatico.htm>
- [17] S. Calderón, G. Romero, A. Ordóñez, A. Álvarez, C. Ludeña, L. Sánchez, C. De Miguel, K. Martínez, y M. Pereira. Impactos económicos del cambio climático en Colombia. Diciembre de 2014. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/11362/37879/1/S1500268_es.pdf
- [18] Green Peace. Huella de carbono: aprende a calcular tu impacto ambiental. Diciembre de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.greenpeace.org/mexico/blog/9386/huella-de-carbono/>