



WATER SECURITY & SUSTAINABLE DEVELOPMENT **WSSD**

COLOMBIA COLLABORATORY

Volumen N° 3

Mario Alejandro Pérez Rincón
Editor

**Huellas Hídrica, de Carbono
y Ecológica del Cultivo
de Caña de Azúcar en la
Cuenca Alta del Río Cauca,
Colombia (1960-2022)**

Universidad del Valle
Programa Editorial
Facultad de Ingeniería – Instituto CINARA

Título: Huellas Hídrica, de Carbono y Ecológica del cultivo de caña de azúcar en la Cuenca Alta del Río Cauca, Colombia (1960-2022)

Editor: **Mario Alejandro Pérez-Rincón**

Autores: **Mario Alejandro Pérez-Rincón, Katherine Mosquera Víquez, Isabella Puente Prado, Daniel Andrés Mosquera, Yinneth Andrea Molina Macías.**

ISBN-PDF: 978-958-507-352-4

Primera Edición

© **UNIVERSIDAD DEL VALLE**

© **AUTORES**

Diseño y diagramación: **Laura María Betancourt Hernández**

Citarse como: Pérez-Rincón, M., Mosquera-Víquez, K., Puente-Prado, I., Mosquera, D. A., Molina-Macías, Y. A. (2025). Huellas Hídrica, de Carbono y Ecológica del cultivo de caña de azúcar en la Cuenca Alta del Río Cauca, Colombia (1960-2022), Vol. 3., Universidad del Valle - Instituto CINARA, Cali, Colombia.

Agradecimientos a: “Water Security and Sustainable Development Hub” funded by the UK Research and Innovation’s Global Challenges Research Fund (GCRF) [grant number: ES/S008179/1].



Este libro ha sido financiado con recursos internacionales, es de libre acceso y puede ser reproducido citando la fuente.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad ni de los financiadores, ni genera responsabilidad frente a terceros.

Cali, Colombia, agosto de 2025

Huellas Hídrica, de Carbono y Ecológica del cultivo de caña de azúcar en la Cuenca Alta del Río Cauca, Colombia (1960-2022)

Mario Alejandro Pérez-Rincón (Editor)
Katherine Mosquera Víquez
Isabella Puente Prado
Daniel Andrés Mosquera
Yinneth Andrea Molina Macías

[3]



Tabla de contenido

Introducción	06
Capítulo 1. La Huella Hídrica en el cultivo de caña de azúcar en la CARC	09
1.1 Definición y contexto histórico de la Huella Hídrica	09
1.1.1 Contexto de la Huella Hídrica en Colombia	11
1.1.2 La Huella Hídrica en cultivo de caña de azúcar	12
1.2 Huella Hídrica de la caña de azúcar en la CARC	13
1.3 Cálculo de la Huella Hídrica del cultivo de la caña de azúcar en la CARC (1960-2022)	15
1.3.1 Cálculo de la Huella Hídrica Verde	18
1.3.2 Cálculo de la Huella Hídrica Azul	19
1.3.3 Cálculo de la Huella Hídrica Gris	20
1.4 Resultados y discusión	22
1.4.1 Huella Hídrica Verde y Azul del cultivo de caña de azúcar	22
1.4.2 Huella Hídrica Gris	25
1.4.3 Huella Hídrica Total (1960-2022)	29
1.4.4 Huella Hídrica neta y bruta	30
1.4.5 Análisis comparativo de la HH con otros estudios y reflexiones finales	31
1.5 Referencias	32
Capítulo 2. La huella de carbono del cultivo de caña de azúcar en la CARC, Colombia (1960-2022)	35
2.1 Contexto y antecedentes	35
2.2 ¿Qué es la Huella de Carbono?	37
2.3 La Huella de Carbono en el cultivo caña de azúcar	39
2.4 Cálculo de la Huella de Carbono del cultivo de la caña de azúcar en la CARC	41
2.4.1 Metodología	41
2.5 Resultados y discusión	43
2.6 Referencias	47
Capítulo 3. La Huella Ecológica del cultivo de caña de azúcar en la CARC, Colombia (1960-2022)	48
3.1 Definición	48
3.2 La Huella Ecológica en la caña de azúcar	52
3.3 Cálculo de la Huella Ecológica en la CARC (1960-2022)	54
3.3.1 Metodología	54
3.4 Resultados	56
3.5 Conclusiones y discusión	59
3.6 Referencias	61
Capítulo 4. Conclusiones y discusiones finales	62
Anexos	66
Anexo 1. Funciones de la Naturaleza	66
1.1 Los Recursos Naturales (RRNN)	66
1.1.1 Desde la Ecología	66
1.2 Medición de los RRNN	67
1.2.1 La visión ortodoxa en la contabilidad de los RRNN	67
1.2.2 La visión heterodoxa en la contabilidad de los RRNN	67
1.3 Las Funciones de la Naturaleza	68
1.3.1 Función abastecedora de la Naturaleza	68
1.3.2 Función asimiladora de la Naturaleza	69
1.3.3 Función soporte de vida de la Naturaleza	69
1.3.4 Los Servicios Ecosistémicos	69
ANEXO 2. Huella Hídrica del cultivo de Caña de azúcar en la CARC	72
ANEXO 3. Huella de Carbono del cultivo de Caña de azúcar en la CARC	73
ANEXO 4. Huella Ecológica del cultivo de Caña de azúcar en la CARC	74
4.1 Secuestro de Carbono	74
4.2 Huella de Carbono Neta	75
4.3 Huella Ecológica	76

Resumen

Desde la Revolución Industrial, las actividades humanas han generado profundas transformaciones en los ecosistemas del planeta, intensificando el consumo de recursos naturales y provocando desequilibrios ecológicos a gran escala. Este fenómeno, conocido como Cambio Ambiental Global, plantea retos significativos para los países del trópico, como Colombia, que enfrentan los mayores impactos del cambio climático con menores capacidades de respuesta.

[5]

Este libro se centra en el caso del monocultivo industrial de caña de azúcar en la Cuenca Alta del Río Cauca (CARC), una actividad económica clave que, sin embargo, ejerce importantes presiones sobre el ambiente. Entre los principales impactos se destacan: el uso intensivo de agua, la quema de la caña que genera emisiones de gases de efecto invernadero, y la transformación del suelo que compromete la biodiversidad.

Desde la perspectiva de la Economía Ecológica y la sustentabilidad fuerte, se reconoce que los recursos naturales no pueden ser sustituidos y que su degradación representa una amenaza para la estabilidad ecológica y económica. Por ello, este trabajo aplica tres indicadores biofísicos de presión ambiental —Huella Hídrica, Huella de Carbono y Huella Ecológica— que permiten cuantificar y comprender el impacto real del monocultivo sobre los ecosistemas de la región.

El documento está compuesto por cuatro secciones y un anexo. En ellas se calcula cada huella de forma detallada y se ofrece un análisis conjunto de las presiones ambientales generadas por esta actividad agroindustrial. Este enfoque busca aportar elementos para el diseño de políticas públicas más sostenibles y para una mejor comprensión de la relación entre economía y naturaleza en la CARC.



[6]

Introducción

EN LOS ÚLTIMOS TRES SIGLOS DE LA HISTORIA HUMANA y desde la Revolución Industrial, el planeta Tierra ha sufrido importantes transformaciones a gran escala, producidas principalmente por la extensión de las actividades antropogénicas. Los incrementos demográficos y del nivel de producción y de consumo, acompañan los incrementos en las tasas de extracción, y uso de los Recursos Naturales (RRNN), generando presiones considerables sobre la biósfera que alteran su equilibrio natural. Hace varias décadas, incluso, la comunidad académica ha planteado que las eras geológicas que en algún momento estaban demarcadas por fenómenos naturales, hoy se ven permeadas por los impactos y efectos adversos que genera el ser humano sobre el planeta¹.

Este fenómeno, también conocido como *Cambio Ambiental Global*, es una de las principales preocupaciones de la agenda mundial, dado que amenaza el equilibrio biofísico de la vida en la Tierra. Estos desequilibrios generan presiones sobre los ecosistemas, afectando las funciones de *provisión, regulación y soporte de vida* de la Naturaleza (véase *Anexo 1. Funciones de la Naturaleza*) y generando impactos en la atmósfera, en los ríos, mares y océanos, en la biodiversidad, en la fauna y la flora, en el suelo, entre otros. Además, al intensificarse la actividad antrópica y al ampliarse la escala económica, los impactos negativos son traslapados hacia los sistemas humanos, siendo los territorios y las comunidades más vulnerables los más afectados. A saber, los países del trópico son los que más se ven impactados por los choques provocados por el Cambio Climático (CC) y, de hecho, cuentan con menos recursos económicos y humanos —y responsabilidad— para contrarrestarlo².

1. Véase los conceptos de antropoceno y capitaloceno.

2. La Organización de Naciones Unidas (ONU, 2021) ha sido enfática al señalar que América Latina y el Caribe «es una de las regiones del mundo más afectadas por el Cambio Climático y los fenómenos meteorológicos externos que están causando graves daños a la salud, a la vida, a la comida, al agua, a la energía y al desarrollo socioeconómico de la región». Véase <https://news.un.org/es/story/2021/08/1495582>.

En la generación de presiones ambientales a gran escala, es la actividad antropogénica la dinámica a la que se atribuye mayor responsabilidad: «*las actividades humanas ejercen presiones que provocan impactos sobre el medio ambiente. Estos cambios afectan al flujo de servicios de los ecosistemas, de cuya integridad depende el bienestar humano*» (Martínez, 2016, p. 97). Si bien, estas presiones pueden ser causadas por diferentes tensores, para analizar dichas causas se han acuñado términos como el IPAT [por sus siglas (I) *Impactos como función del crecimiento de la Población (P), Abundancia (A) que recoge el crecimiento del PIB y del Consumo per cápita y la Tecnología (T)*]. Como lo menciona Jordi Roca-Jusmet (2010) en su artículo sobre presiones ambientales «*he utilizado la expresión IPAT para introducir los factores que explican los cambios en las presiones ambientales. Es una expresión muy simple pero extremadamente útil para poner en pie de igualdad los tres factores centrales que están en el debate sobre los problemas ecológicos*». A grandes rasgos, esta expresión permite comprender cómo el tamaño de la población, la cultura de consumo y producción (abundancia) y el desarrollo tecnológico influyen en la magnitud de los impactos ambientales. Así, el autor plantea tres ideas centrales sobre la base del problema ambiental:

- i) que, aunque la *población* de la Tierra es suficientemente grande, lo cierto es que no sigue tendencias crecientes y que está lejos de tener un nuevo «boom demográfico» como el vivido en los años 60, en la posguerra;
- ii) que en la cultura de la afluencia o *abundancia* de bienes y servicios se encuentra un motor clave del impacto ambiental porque, a diferencia de las tendencias poblacionales, el consumo tiende a crecer, sigue en expansión y la evidencia no muestra signos de desaceleración. Esta “perpetuación” de la demanda de productos resalta el gran desafío que existe, en la práctica, sobre la idea de no sobrepasar los límites planetarios; y
- iii) que la *tecnología*, a pesar de ser vista frecuentemente como una solución al problema ambiental desde una óptica de *optimismo tecnológico*, puede generar efectos ambientales tan grandes que no son siempre proporcionales al crecimiento económico. Sin embargo, es importante considerar qué tipo de actividades económicas predominan y cuáles son los impactos ambientales asociados, pues actividades como los servicios educativos o de cuidado de la tercera edad no impactan igual que, por ejemplo, la producción masiva e intensificada de automóviles.

A partir de lo anterior, el autor advierte que los desequilibrios ecológicos actuales están más vinculados con la expansión descontrolada del consumo y de la producción asociada que con el crecimiento demográfico o los avances tecnológicos per-se. La persecución del crecimiento económico sostenido es la razón fundamental del problema ecológico.

Desde la perspectiva de la Economía Ecológica (EE), los RRNN cumplen un rol fundamental en las actividades agrícolas intensivas, pues son esenciales para la generación de valor económico. Sin embargo, desde este marco de análisis, los RRNN y la naturaleza en general, no son únicamente la base material de toda producción, sino que sostienen funciones ecológicas vitales e *insustituibles* (no pueden ser reemplazadas por capital creado por los humanos) que son esenciales para el equilibrio del sistema natural. La sostenibilidad fuerte, uno de los principios centrales de la EE, enfatiza que la pérdida o degradación de estos RRNN no es compensable, pues son fundamentales para la estabilidad ecológica a largo plazo y, en consecuencia, para el valor económico.

En este sentido, la producción de desequilibrios ecológicos por parte de la agricultura industrial se muestra como un tema de estudio relevante a la hora de analizar, en este caso específico, los impactos del monocultivo industrial de caña de azúcar en la Cuenca Alta del Río Cauca (CARC). Y si bien este monocultivo representa una actividad económica clave para la región, también es una fuente considerable de presiones ambientales. En primer lugar, esta actividad agroindustrial requiere de enormes cantidades de agua, tanto superficial como subterránea, para sostener los ciclos de riego en la etapa del cultivo. Esta captación intensiva de agua para la gran escala del cultivo (más de 260 mil hectáreas), puede detonar en un agotamiento progresivo de las fuentes hídricas, lo cual pone en riesgo no sólo la sostenibilidad a largo plazo del cultivo, sino también la provisión de agua para otros usos en la región, incluyendo el consumo humano y el mantenimiento de los ecosistemas. En segundo lugar, la quema de residuos de caña, una práctica común en la agroindustria cañera es responsable de significativas emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), especialmente CO₂, lo que contribuye directamente al Cambio Climático (CC) y a la contaminación atmosférica con efectos locales para la salud de las personas y los ecosistemas. Finalmente, la expansión territorial del monocultivo a lo largo de los años ha provocado fuertes cambios en los usos del suelo, ocupando territorios como el bosque seco tropical que caracteriza la región y humedales para la implantación de este cultivo perenne. Esto se ha traducido en pérdidas de biodiversidad y de la capacidad de los ecosistemas para ofrecer correctamente sus servicios de soporte³.

Así, motivados por entender y cuantificar los grandes impactos ambientales que genera el monocultivo de Caña de Azúcar en la CARC, se realizó el Volumen No. 3 sobre presiones ambientales como parte del proyecto “*Contribuciones de la naturaleza a la generación de valor económico en el cultivo de la caña de azúcar en la Cuenca Alta del Río Cauca (CARC)*”. Precisamente, estos cálculos se enfocan en los efectos sobre el agua, la tierra y el aire, a través del uso de tres metodologías de **indicadores biofísicos de sustentabilidad**, en este caso *huellas*, que permiten medir la presión ambiental ejercida sobre

[7]

3. Como la regulación del ciclo del agua o la absorción de carbono.

un ecosistema o región. De esta manera, la *Huella Hídrica*⁴, la *Huella de Carbono*⁵ y la *Huella Ecológica*⁶ son indicadores que permiten analizar el problema no sólo desde una perspectiva económica, sino también desde una perspectiva material y en términos absolutos para una comprensión más integral de las presiones ambientales que la actividad agrícola intensiva genera sobre el ambiente en la región.

Al trabajar con el enfoque de sustentabilidad fuerte, el foco de la política ambiental en la EE se mueve desde el estado del ambiente⁷ hacia la presión sobre el ambiente, con lo cual adquieren peso los indicadores biofísicos de presión. Estos indicadores contienen información acerca del tamaño de la presión y de la actividad económica que causa dicha presión. Ejemplos típicos de estos indicadores son: CO₂ por tipo de actividad económica por año; recursos materiales usados por una actividad productiva año; cantidad de hectáreas sembradas; cantidad de agua consumida por actividad económica; balances energéticos de una actividad productiva; toneladas exportadas por año; incremento del área construida por año, etc. (Pérez-Rincón, et. al, 2024, P. 305). De tal manera, en vez de un sistema de indicadores referidos a “daños ecosistémicos” cada vez hay más referencia a indicadores que permitan identificar las “interacciones sociedad-naturaleza” (Weisz, 2001, P. 5).

Una importante utilidad de los indicadores de presión es que estos se originan en el inicio de la cadena causal de las relaciones socio-ambientales en donde las actividades socio-económicas son el más importante factor de presión y de daño sobre los RRNN.

Además de la presente introducción, este Volumen No. 3 está compuesto por cuatro secciones y un anexo. Los siguientes tres capítulos abordan el cálculo de las *Huellas Hídrica, de Carbono y Ecológica*, respectivamente, y se sintetizan en el apartado final, donde además se realiza un análisis conjunto de estas presiones. Finalmente, se presenta el Anexo sobre las Funciones de la Naturaleza dentro de los sistemas económico y social. Con este enfoque, se espera contribuir a un mejor entendimiento de las dinámicas entre el uso de recursos y los límites biofísicos de la región, asociados en este caso al monocultivo de la caña de azúcar.

Un punto final por señalar es que las series de tiempo de *producción, hectáreas sembradas y hectáreas cosechadas* corresponden al periodo 1960-2022 y fueron obtenidas a partir de la construcción de la Base de Datos para realizar el análisis econométrico que se presenta en el Informe Final de este proyecto (Volumen No. 1).

4. La Huella Hídrica mide el consumo directo e indirecto de agua asociado a una actividad o proceso.

5. La Huella de Carbono estima las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) asociadas a una actividad o proceso.

6. La Huella Ecológica calcula la cantidad de tierra y mar necesarios para sostener una determinada actividad en términos de recursos y absorción de residuos.

7. Los indicadores que corresponden a este concepto valoran el estado del ambiente natural o su calidad ambiental. Esta categoría incluye indicadores de conservación (número de áreas protegidas, número de especies en peligro de extinción), índices de biodiversidad, indicadores de calidad de agua o contaminación de tóxicos en el suelo, aire o agua.



La huella hídrica en el cultivo de caña de azúcar

Capítulo 1: en la CARC

EN ESTA SECCIÓN SE LLEVA A CABO EL CÁLCULO de la Huella Hídrica (HH) para el monocultivo de caña de azúcar en la CARC. En primer lugar, se presenta una definición conceptual general de la HH, acompañada de un contexto histórico y de antecedentes relevantes. A continuación, se presenta una breve revisión de la literatura relacionada con la HH en la agricultura, enfocándose específicamente en la caña de azúcar, donde se mencionan los resultados obtenidos a partir de su cálculo tanto a nivel global como local, y se analizan las diferentes metodologías utilizadas. Con base en esta revisión, se selecciona una metodología para estimar la HH de la caña de azúcar en la CARC. El cálculo de este indicador de presión se expresa en términos de volumen de agua por unidad de producto. Finalmente, se exponen los resultados de la estimación y se ofrecen conclusiones sobre los hallazgos obtenidos.

1.1 Definición y contexto histórico de la Huella Hídrica

Con el crecimiento de la sociedad, la escasez de recursos de agua dulce en el mundo se ha vuelto cada vez más evidente (Gleick, 2000; Mekonnen y Hoekstra, 2011). A medida que la población sigue en aumento y los hábitos alimentarios evolucionan, esta situación continuará agravándose (Rosegrant y Ringler, 2000). Es en este contexto, que la Huella Hídrica (HH) se ha convertido en un indicador clave para medir la sostenibilidad en el uso de los recursos hídricos permitiendo evaluar el impacto del consumo de agua en diversas actividades y sectores. Introducida en 2002 por Arjen Hoekstra, del Instituto UNESCO-IHE (Instituto para la Educación sobre el Agua, adscrito a la UNESCO, con sede en Delft, Holanda) (Hoekstra, 2003), con el fin de contar con un indicador basado en el consumo de agua que pudiera proporcionar información útil además de los indicadores tradicionales basados en el sector de producción. Por lo tanto, la HH tiene una importancia práctica para evaluar el impacto ambiental y la asignación de los recursos hídricos.

El concepto de HH se basa principalmente en el deseo de ilustrar los vínculos ocultos entre el consumo humano y el uso del agua, y entre el comercio mundial y la gestión de los recursos hídricos (Hoekstra y Chapagain, 2007). Así, la HH se define como un indicador de uso y apropiación del agua dulce por parte de los seres humanos, que no solo tiene en cuenta el uso directo del agua por parte de un consumidor o productor, sino también su uso indirecto. La HH de un producto es el volumen de agua dulce utilizado para producir ese producto, medido a lo largo de toda la cadena de suministro. Es un indicador integral de la apropiación del agua, que refleja los volúmenes consumidos según su origen y los volúmenes de agua contaminada en función de diferentes tipos de contaminación. Estos volúmenes se estiman en una escala geográfica y temporal específica, de manera que todos los componentes de una huella hídrica total (HH_{total}) se detallan de forma geográfica y temporalmente precisa (Hoekstra et al., 2011). Además, se trata de un indicador multidimensional y se desglosa en tres componentes principales: la Huella Hídrica Azul (HH_{azul}), la Huella Hídrica Verde (HH_{verde}) y la Huella Hídrica Gris (HH_{gris}) (Ver Tabla 1.1).

La Figura 1.1 presenta un esquema general que identifica los tres componentes clave de la HH y su relación con la gestión tradicional del agua. A diferencia de los enfoques tradicionales, la HH no solo incluye el uso de aguas azules, sino también de aguas verdes y grises, ofreciendo así una visión más integral. Además, no se limita al “uso directo del agua” o las “extracciones del agua”, ya que también incorpora los usos indirectos a lo largo de la cadena de suministro. Un punto importante es que no considera el uso de aguas azules que son devueltas al lugar de origen, subrayando su enfoque en el agua realmente consumida o contaminada (Chapagain, 2017).

La HH fue desarrollada como una analogía del concepto de Huella Ecológica (HE), propuesto en la década de 1990 por William Rees. Este concepto permite analizar el impacto de los hábitos de vida y consumo de la población en un contexto de recursos naturales finitos

	Definición
Huella Hídrica Verde	Es el volumen de agua lluvia que se consume por la vegetación y no se convierte en escorrentía. Esta agua se almacena en los estratos superficiales del terreno satisfaciendo la demanda natural de la vegetación y los cultivos.
Huella Hídrica Azul	Se refiere al consumo de los recursos de agua superficial y subterránea a lo largo del ciclo de vida del producto o actividad. El consumo se refiere a la pérdida de agua disponible en un depósito superficial en la zona de captación. Las pérdidas se producen cuando el agua se evapora, vuelve a otra área de influencia, al mar o se incorpora a un producto.
Huella Hídrica Gris	Hace referencia a la contaminación y se define como el volumen de agua teórico-necesaria para lograr la dilución de un contaminante específico de forma que no altere la calidad del agua en el cuerpo receptor. No se refiere a generar un nuevo consumo, sino a reducir el volumen de contaminante.

Tabla 1.1 Componentes de la Huella Hídrica

Fuente: elaboración propia con base en Hoekstra et al., (2011) y Arévalo (2012)

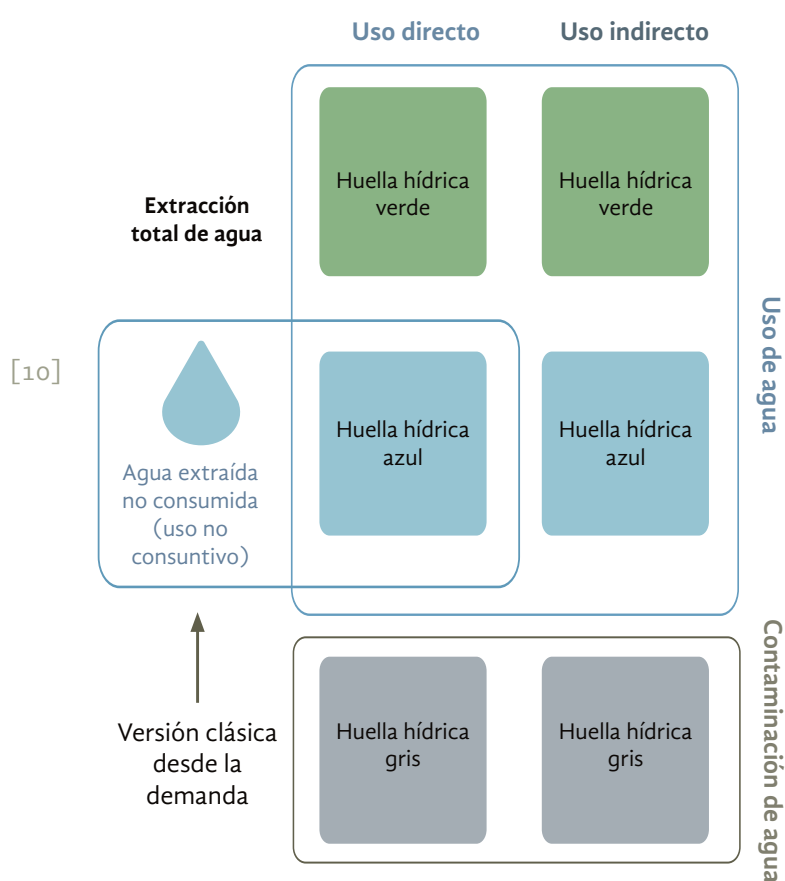


Figura 1.1 Componentes de la Huella Hídrica

Fuente: adaptado de Hoekstra et al., (2011) e (IDEAM, 2015a)

(Wackernagel y Rees, 1996), es decir, el área necesaria para sostener determinado nivel de vida de las personas. Por su parte, la HH indica el volumen de agua anual requerido para sostener la población bajo ese estándar de vida (Pérez et al., 2011). A su vez, la HH se basa en el desarrollo amplio de tres conceptos previos: agua verde, agua azul y agua virtual, los cuales proveen la mayor parte de la base conceptual y metodológica (ENA, 2014).

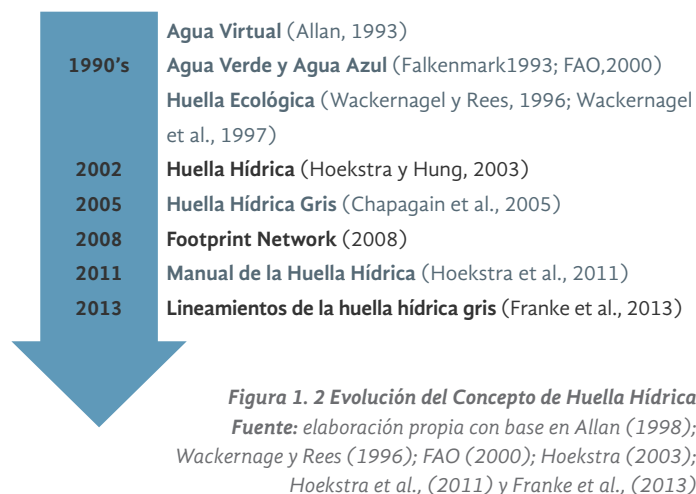
- **Agua Verde:** el concepto de agua verde, introducido por Malin Falkenmark en 1993, se refiere a la humedad del suelo utilizada por la vegetación en secano para el crecimiento de la biomasa y la evapotranspiración. La FAO actualizó esta definición, describiéndola como el flujo vertical de agua que no recarga fuentes superficiales o subterráneas. Este concepto reconoce a los ecosistemas naturales como usuarios del agua, compitiendo de manera cuantificable por el recurso.

- **Agua Azul:** La definición del agua verde llevó naturalmente a la creación del concepto de agua azul, que representa el flujo horizontal del agua, abarcando el agua de escorrentía, fuentes superficiales como ríos y lagos, y fuentes subterráneas como acuíferos (FAO, 2000). Este término engloba todo el recurso hídrico superficial y subterráneo bajo una única idea, alineándose con la visión tradicional de la Gestión Integral del Agua.

- **Agua Virtual:** El concepto de HH está estrechamente vinculado al concepto de agua virtual. Este fue introducido por John Anthony Allan a principios de los años noventa (Allan, 1993, citado en Hoekstra y Chapagain, 2007), se refiere al volumen de agua requerido o contaminado durante la producción de un bien o servicio a lo largo de su cadena de suministro. Este concepto implica que, al exportar o importar un producto, también se transfiere el agua virtual asociada a él. En términos cuantitativos, el contenido de agua virtual de un producto equivale a su HH. A diferencia del agua virtual, la HH ofrece la posibilidad de un análisis multidimensional, espacial y temporalmente explícito, orientado a entender la interacción entre las actividades antrópicas y la relación del agua con la cuenca (IDEAM, 2015b).

Basado en estos conceptos, la HH, introducida por Hoekstra en 2002, ha evolucionado y expandido su aplicación en diversos ámbitos (véase Figura 1.2). Su evaluación y desarrollo se han implementado en estudios de diversos productos y contextos, lo que ha permitido una mejor comprensión del impacto del consumo de agua en la producción de bienes y servicios.

A partir de 2008, el interés por la HH creció significativamente, lo que llevó a la creación de la Red de la Huella Hídrica (WFN, por sus siglas en inglés), una red compuesta por instituciones académicas, gobiernos, organizaciones no gubernamentales, empresas, inversores e instituciones de las Naciones Unidas. Uno de los objetivos principales de esta red es establecer un lenguaje común y un marco coherente y científicamente sólido para la evaluación de la HH (WFA, *Water Footprint Assesment* por sus siglas en ingles) que pueda adaptarse a diferentes intereses, tales como la WFA de productos, empresas y naciones.



En 2009, unos siete años después del primer uso del concepto de HH, la WFN publicó la primera versión del estándar global para la evaluación de la HH (Hoekstra et al., 2009). Dos años después se publicó la segunda versión (Hoekstra et al., 2011). Este estándar, que se elaboró en un proceso de consultas con organizaciones e investigadores de todo el mundo y se sometió a una revisión científica por pares, tiene definiciones y métodos completos para la contabilidad de la HH. Muestra cómo se calculan las HH para procesos y productos individuales, así como para consumidores, naciones y empresas. También incluye métodos para la evaluación de la sostenibilidad de la HH y una lista de opciones de respuesta a la misma (Erce y Hoekstra, 2012). Una evaluación de la HH incluye cuatro fases (Figura 1.3):

1. *Establecimiento de objetivos y alcance*: Identificación de los objetivos y el alcance de la evaluación, incluidos los límites geográficos/temporales y de procesos/cadena de suministro.
2. *Contabilidad de la huella hídrica*: Cálculo de la huella hídrica operativa ("directa") y de la cadena de suministro ("indirecta"), incluidos los parámetros de cantidad y calidad.
3. *Evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica*: Evaluación de la huella hídrica frente a la huella ambiental, criterios sociales y económicos.
4. *Formulación de respuestas a la huella hídrica*: Identificación de acciones estratégicas para reducir la huella hídrica o mejorar su sostenibilidad.

La investigación sobre la HH ha avanzado considerablemente en las últimas dos décadas, consolidándose como una herramienta más precisa y realista para evaluar el uso y consumo de los recursos hídricos en comparación con los métodos convencionales. Tal como lo demuestran los hallazgos de Sun et al., (2022), si bien los estudios iniciales sobre la HH se centraron en el agua consumida, el enfoque se ha ampliado para abordar también el impacto ambiental, el CC y el desarrollo sostenible. Este enfoque ha sido aplicado principalmente en los sectores agrícola e industrial, aunque su implementación en el sector de servicios sigue siendo limitada, lo que subraya la necesidad de más investigaciones en esta área. Además, se destaca la importancia de realizar estudios comparativos entre diferentes países y regiones, así como de promover enfoques interdisciplinarios que integren tanto teorías económicas como experimentación científica, a fin de proporcionar un análisis más exhaustivo de los impactos hídricos.

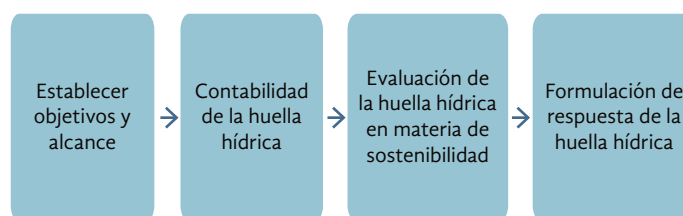


Figura 1. 3 Fases de la evaluación de la huella hídrica
Fuente: Hoekstra et al., (2011)

[11]

1.1.1 Contexto de la Huella Hídrica en Colombia

En Colombia, una de las iniciativas pioneras de aplicación de la huella hídrica (HH) comenzó con el Proyecto Suiza Agua Colombia, en 2010, liderado por la Agencia para el Desarrollo y la Cooperación Suiza (Cosude) y dirigido inicialmente al sector empresarial. Luego, otro ejercicio que aplicó la huella hídrica en Colombia para la agricultura a nivel nacional fue el realizado por Arévalo (2012) del *World Wide Fund for Nature* (WWF). Los resultados de este trabajo dieron lugar al Proyecto de evaluación de la huella hídrica en la cuenca del río Porce, que permitió tener una primera aproximación detallada a la aplicación multisectorial de la huella hídrica en una cuenca (Arango, 2014).

Sin embargo, previamente a estos trabajos, a partir de su tesis doctoral (2006), Pérez-Rincón publica en formato de libro (2007) un estudio que analizó la relación entre el comercio internacional y el medio ambiente en Colombia desde la perspectiva de la economía ecológica. Este trabajo incluyó un análisis de la HH en la agricultura colombiana en el periodo 1961-2004, evidenciando cómo la expansión agrícola, impulsada por las dinámicas del comercio exterior, afectaba el uso del agua en diferentes regiones del país. Este trabajo incluyó un análisis en regiones específicas como el Valle del Cauca y la cuenca del río Bolo.

Por otro lado, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en su Estudio Nacional del Agua (ENA), aborda el uso del agua bajo el concepto de demanda hídrica. Este término se refiere al volumen de agua extraído del entorno natural para suplir las necesidades de consumo humano, producción sectorial y las demandas esenciales de los ecosistemas. La demanda hídrica incluye tanto el agua que es usada en procesos productivos y para abastecimiento doméstico, como la parte del agua extraída que puede ser devuelta a la cuenca de origen. Este análisis considera tanto las fuentes hídricas superficiales como las subterráneas. Existen conceptos adicionales como los flujos de retorno, que representan el volumen de agua que no es cuantificado en la HH azul y, por lo tanto, no es apropiado por una actividad humana, y genera un retorno a la cuenca como excedente de las actividades económicas y el consumo humano. Para los flujos de retorno se considera el impacto asociado al momento y al lugar de retorno, que implica un uso de agua total o parcialmente excluyente con otros usos del agua, en un determinado territorio y periodo de tiempo (IDEAM, 2022).

Sin embargo, para complementar el análisis de los usos del agua, desde el ENA en el 2014, se han incorporado los conceptos asociados a la HH, los cuales ayudan a mejorar la interpretación de los resultados en los análisis desagregados de los usos sectoriales del agua y su impacto territorial. En particular, la HH azul ha surgido como un concepto complementario a la demanda hídrica, que hace posible analizar el uso de agua azul generada a partir de la extracción de un volumen de agua de ríos, quebradas y acuíferos. Así, la HH azul es la porción de la demanda hídrica que no retorna a la cuenca por una combinación de los tres fenómenos básicos presentes a partir de la extracción del agua: (1) incorporación a un producto, (2) evaporación y/o (3) trasvase (IDEAM, 2015).

En la Tabla 1.2 se comparan los valores totales estimados de la demanda y la huella hídrica azul para distintos sectores, según el ENA realizado por el IDEAM en 2022. En el año 2020, el 43,25% de la demanda hídrica en Colombia se atribuye a actividades del sector agrícola (agricultura y postcosecha). Sin embargo, en términos de HH_{azul} , este porcentaje asciende al 71,10%.

Según los datos del *National Water Footprint Accounts*, desarrollado por Mekonnen y Hoekstra (2011a), solo cinco países concentran el 50% de la HH de la producción mundial: India, China, Brasil, Estados Unidos y Rusia. En el contexto sudamericano, Colombia ocupa el tercer lugar en términos de HH en producción, después de Brasil y Argentina. Sin embargo, a pesar de su alto índice de HH, Colombia también es uno de los países con mayor disponibilidad de recursos hídricos renovables a nivel global. Con una oferta hídrica cercana a los 2,300 km³/año, Colombia se posiciona como el séptimo país en el mundo con mayor disponibilidad de agua dulce. No obstante, es importante tener en cuenta que, durante los años secos medios, esta

Millones de m ³ /año	Demanda hídrica	Huella hídrica azul	Flujos de retorno
Agricultura y postcosecha	13.984,10	6.283,40	7.699,80
Hidroenergía	8.224,40	436,40	86.449,40
Piscícola	3.971,80	156,50	3.820,80
Doméstico	2.857,90	368,90	2.570,80
Pecuarios y sacrificio	1.538,70	1.156,90	381,70
Minería	660,90	126,00	534,90
Hidrocarburos	419,50	41,50	378,00
Industria	364,10	212,00	224,10
Servicios/oficial	210,70	23,10	177,50
Construcción	99,90	33,00	66,90

Tabla 1.2 Demanda Hídrica, Huella Hídrica Azul y Flujos de Retorno en Colombia para el Año 2020
Fuente: IDEAM (2022)

oferta puede reducirse hasta en un 38%, lo que subraya la importancia de gestionar de manera eficiente este recurso vital (Arévalo, 2012).

En la literatura reciente sobre la HH en Colombia, diversos estudios han abordado el impacto en el uso del agua en distintos sectores productivos y escalas. Investigaciones, como el reporte del *World Wide Fund for Nature* en el 2012 mencionado anteriormente, han mostrado que el sector agrícola, especialmente en la producción de cultivos como café, maíz, arroz, plátano y caña de azúcar, contribuye significativamente a la HH total del país, con porcentajes del 22%, 13%, 12%, 11% y 11%, respectivamente (Arévalo, 2012). Por otro lado, un estudio reciente de Álvarez-Pugliese et al., (2021) calculó la HH en la extracción de oro en Suárez - Cauca, resaltando el impacto hídrico de la minería. Además, otro tipo de publicaciones como la de Arango (2014), en la cual determinó la HH del sector doméstico en la cuenca del Río Porce, en el Departamento de Antioquia, evidenciando el uso significativo del agua en el ámbito residencial.

1.1.2 La Huella Hídrica en el cultivo de caña de azúcar

La HH permite comprender mejor el uso que el ser humano hace del agua, un recurso cada vez más limitado, especialmente ante el crecimiento poblacional y económico. Aunque el 2.5% del agua en la Tierra es dulce, gran parte de ella se encuentra congelada o en acuíferos de difícil acceso. Esto reduce a menos del 1% el agua disponible para el consumo humano. Su disponibilidad está condicionada por diversos factores, como los modelos de desarrollo, los hábitos de consumo, y el

crecimiento económico, lo que hace aún más urgente gestionar este recurso de manera eficiente (Renderos, 2014; Arévalo, 2012).

En sectores como la agricultura, el agua es un recurso esencial para la producción de alimentos, lo que agrava aún más la presión sobre su disponibilidad. La agricultura, en particular, es responsable de aproximadamente el 70% del uso mundial de agua dulce, convirtiéndola en el mayor consumidor de este recurso (Lifeng, 2023). Adicionalmente, de acuerdo a Arévalo (2012), una estimación de la HH diferenciada por sectores evidencia que la agricultura tiene un impacto del 81%, mientras que la actividad pecuaria es del 11%, la industrial 4% y la doméstica otro 4%.

La agricultura incluye diversos cultivos que, por sus características, pueden ejercer una mayor o menor presión sobre los recursos hídricos. Entre estos cultivos, se encuentra la caña de azúcar la cual se destaca por su importancia económica y productiva en muchos países. Puesto que, este cultivo no solo contribuye a la producción de alimentos, sino que también es esencial para la obtención de productos como el azúcar, los biocombustibles, el alcohol y las mieles, entre otros. Sin embargo, su rápida expansión en algunas regiones ha generado la preocupación por la demanda de recursos naturales como también del agua, especialmente donde el acceso al recurso es limitado (Cortés, 2013; Ramírez et al., 2022). Como resultado, diversos estudios se han llevado a cabo para cuantificar la huella en el cultivo de caña de azúcar, en particular en regiones donde este cultivo tiene una importancia económica significativa.

A escala nacional, la caña de azúcar es el tercer cultivo permanente con mayor HH_{azul} en Colombia, después de la palma de aceite y el plátano. Este cultivo representa un consumo de unos 774,9 millones de metros cúbicos de agua al año, un poco menos que los casi 2000 millones que consumen los cultivos de palma de aceite y plátano juntos, pero menos de la mitad de lo consumido por los pastos de corte en el mismo periodo, esto, por medio de procesos de irrigación y aprovechamiento de fuentes superficiales (IDEAM, 2015b). En cuanto a su localización, el cultivo de caña de azúcar se concentra mayoritariamente en el valle geográfico del río Cauca, una de las principales regiones agrícolas del país, debido a sus condiciones edafoclimáticas favorables y a la disponibilidad de fuentes de agua para riego.

Como resultado, varios estudios nacionales han profundizado en la HH del cultivo de caña de azúcar en el Valle Geográfico del río Cauca. Por ejemplo, Ramírez et al. (2022) evaluaron específicamente la caña de azúcar orgánica en esta región, encontrando una HH_{verde} de 117,07 m³ por tonelada y una HH_{azul} de 37,44 m³ por tonelada, lo que resulta en una HH_{total} de 154,51 m³ por tonelada. En un estudio complementario, Pérez et al. (2011) a partir del cálculo de la HH en la agricultura identificaron un incremento en el uso de agua agrícola en el

Valle del Cauca, impulsado principalmente por la expansión del cultivo de caña de azúcar. A su vez, centros de investigación especializados en el cultivo también han realizado aproximaciones a la estimación de la HH, como el Centro de Investigación de Caña de Azúcar CENICAÑA para el año 2016, donde se obtuvo un valor de HH de 115 m³/ton. Este estudio resalta que el componente verde de la HH corresponde al 52% del total en la etapa de campo, y el 36% de la HH global. Esto representa la importancia del agua de lluvia para satisfacer el requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar en la región, donde el riego es de régimen suplementario. Con respecto al componente azul, la estimación indica que representa cerca del 35% de la HH en la etapa de campo y el 26% en la HH global (Múnera y Gil, 2019).

Estos resultados destacan la relevancia de la HH y sus componentes, y proporcionan recomendaciones clave para mejorar la gestión del recurso hídrico a nivel nacional. Sin embargo, los estudios que abordan este tema con mayor detalle y a diferentes escalas siguen siendo limitados, lo que subraya la necesidad de investigaciones más profundas que permitan generar indicadores de sostenibilidad hídrica más robustos y aplicables. Este estudio representa una primera aproximación a la cuantificación de la cantidad teórica de agua requerida en la producción de caña de azúcar en la CARC; se basa en los lineamientos metodológicos propuestos en el Manual de Evaluación de la Huella Hídrica de Hoekstra et al. (2011) y utiliza el programa computacional CROPWAT 8.0 de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO).

1.2 Huella Hídrica de la caña de azúcar en la CARC

El análisis de la HH en la producción de caña de azúcar se realizó para un área cultivada de 265.138 hectáreas, ubicadas en la CARC. El área de estudio comprende la intersección de los departamentos de Cauca, Valle del Cauca, Risaralda, Quindío y Caldas, con la divisoria de aguas entre las cordilleras Central y Occidental, conformando el valle interandino en el que transcurre el río Cauca en su parte alta de la cuenca. La CARC cubre un área aproximada de 22.900 km², distribuida entre los departamentos de Cauca (32%), Valle del Cauca (47%), Risaralda (13%) y Quindío (8%).

El uso predominante del recurso hídrico superficial en esta región es la agricultura, que absorbe el 58,45% de la demanda total de agua. Le siguen el uso doméstico, que representa el 21,13%, el uso industrial con el 19,34%, y el uso pecuario, que constituye el 1,09%. Dentro del sector agrícola, la mayor parte del agua se destina a la irrigación de cultivos, destacándose el cultivo de caña de azúcar como el principal demandante de este (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021). Como se ilustra en la Figura 1.4, la caña de azúcar se concentra principalmente en la zona plana de CARC, correspondiente al valle geográfico de este importante sistema fluvial.

[14]

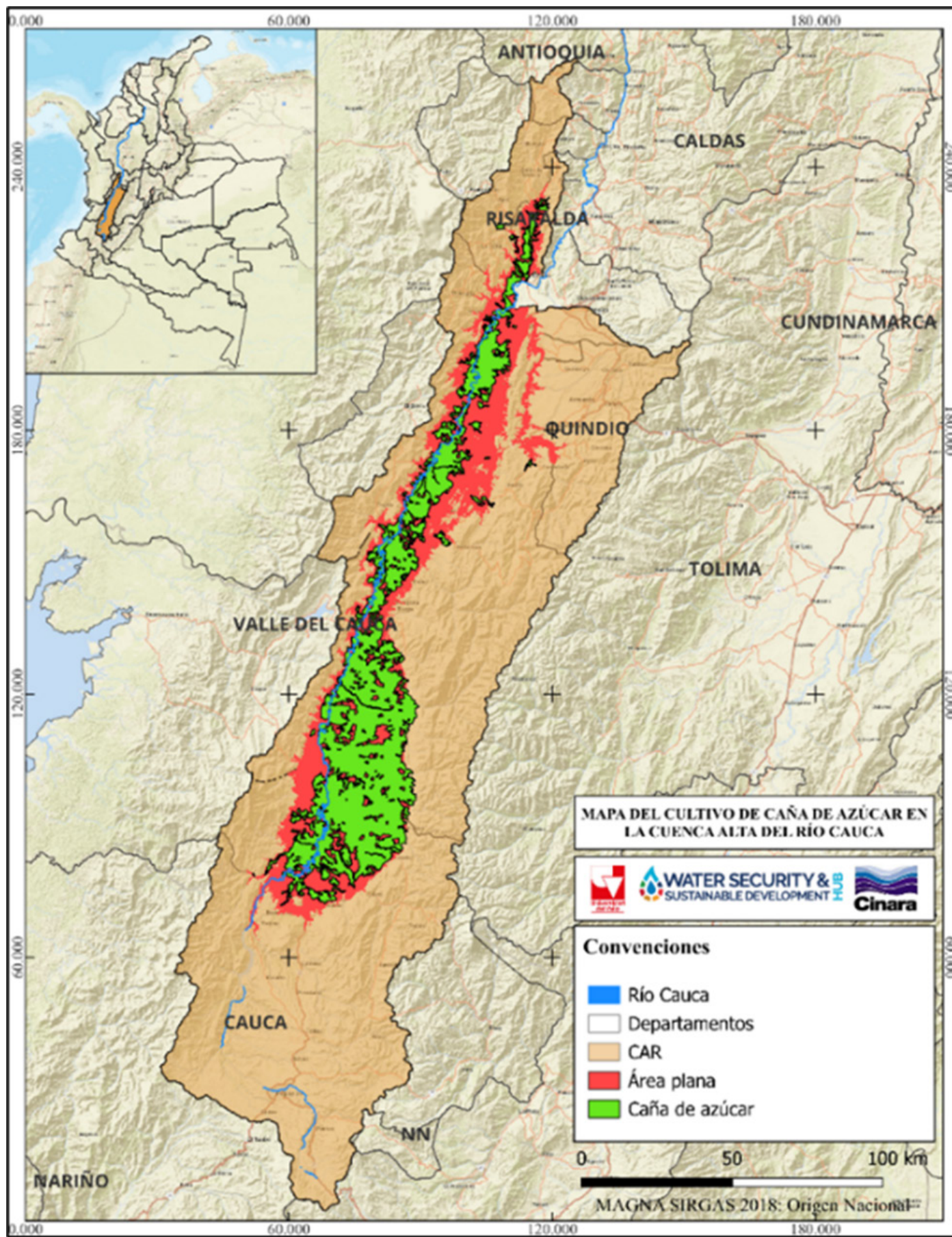


Figura 1. 4 Relación entre el Área Plana de la Cuenca Alta del Río Cauca y el Área Sembrada de Caña de Azúcar
Fuente: Elaboración propia con base a HUB Collaborative, a partir de datos del IDEAM (2018)

1.3 Cálculo de la Huella Hídrica del cultivo de la caña de azúcar en la CARC (1960-2022)⁸

El cálculo de la HH del cultivo de la caña de azúcar se realizó teniendo como base los lineamientos establecidos en el Manual de Evaluación de la Huella Hídrica, definidos para el proceso de crecimiento de un cultivo agrícola (Hoekstra et al., 2011). La huella hídrica total del proceso de producción de caña de azúcar está determinada a partir de la sumatoria de los componentes verde y azul, en unidad de volumen por unidad de masa (m3/tonelada), como se presenta en la siguiente ecuación:

$HH_{total} (m^3) = HH_{azul} + HH_{verde} + HH_{gris}$

Donde,

HH_{azul} = Huella Hídrica Azul (m³)

HH_{verde} = Huella Hídrica Verde (m³)

HH_{gris} = Huella Hídrica Gris (m³)

Para el cálculo de la huella verde y azul del cultivo de caña de azúcar en la CARC, se estableció el siguiente proceso metodológico, siendo su principal objetivo la obtención y análisis de los datos climáticos requeridos (ver Figura 1.5).



Figura 1. 5 Etapas del desarrollo de la metodología utilizada para el cálculo de la HH azul y verde para la producción de caña de azúcar en la CARC, 1960 - 2022
Fuente: Elaboración propia

1. Cuantificación de hectáreas sembradas por año de caña de azúcar en la CARC

Para la obtención de las hectáreas sembradas de caña en la CARC durante el periodo de 1960 a 2022, se utilizaron diversas fuentes de información. Hasta 1979, los datos provienen del estudio de Buenaventura (1986), mientras que para el periodo hasta 2003 se emplearon los registros de Perafán (2012). Para el año 2006, los datos se obtuvieron de Vásquez et al., (2013) y, finalmente, para el periodo de 2007 a 2022, la información fue proporcionada por la UPRA (2023).

2. Estimación de rendimiento del cultivo de caña de azúcar

El rendimiento, que se refiere a la cantidad de caña de azúcar producida por unidad de área cultivada y se expresa en toneladas por hectárea (t/ha), fue determinado a partir de datos de producción recopilados de diversas fuentes. Hasta 1979, los datos fueron extraídos de Buenaventura (1986); para el periodo hasta 2006, se utilizó el Anexo Estadístico del Informe Anual de Asocaña (2013-2014) y el Informe Anual de Asocaña (2004). A partir de 2007, se emplearon datos de la UPRA (2023).

3. Recopilación y análisis de variables climáticas en la CARC

Utilizando la herramienta libre de Google Earth Engine (GEE), una plataforma diseñada para el análisis y procesamiento de datos geoespaciales, se obtuvo la información climática utilizando la base de datos mundial de TerraClimate⁹. A partir de esta base de datos, se extrajeron los datos de precipitación y evaporación anuales para toda la cuenca, correspondientes al periodo de 1960 a 1992. Este análisis se llevó a cabo siguiendo el proceso metodológico que se detalla en la siguiente figura:



Figura 1. 6 Proceso metodológico para la obtención de datos climáticos necesarios en el cálculo de la huella del cultivo
Fuente: Elaboración propia

8. Los datos empleados de área sembrada y rendimiento en este cálculo corresponden a los mismos utilizados en el modelo econométrico del Documento N°. 1 «Contribuciones de la naturaleza a la generación de valor económico en el cultivo de caña de azúcar en la Cuenca Alta del Río Cauca (CARC)».

9. <https://www.climatologylab.org/terraclimate.html>: TerraClimate es un conjunto de datos de clima mensual y balance hídrico climático para superficies terrestres globales desde 1958. Estos datos proporcionan información importante para los estudios ecológicos e hidrológicos a escala global que requieren alta resolución espacial y datos variables en el tiempo. Todos los datos tienen una resolución temporal mensual y una resolución espacial de ~4 km (1/24 de grado). Los datos cubren el período 1958-2022.

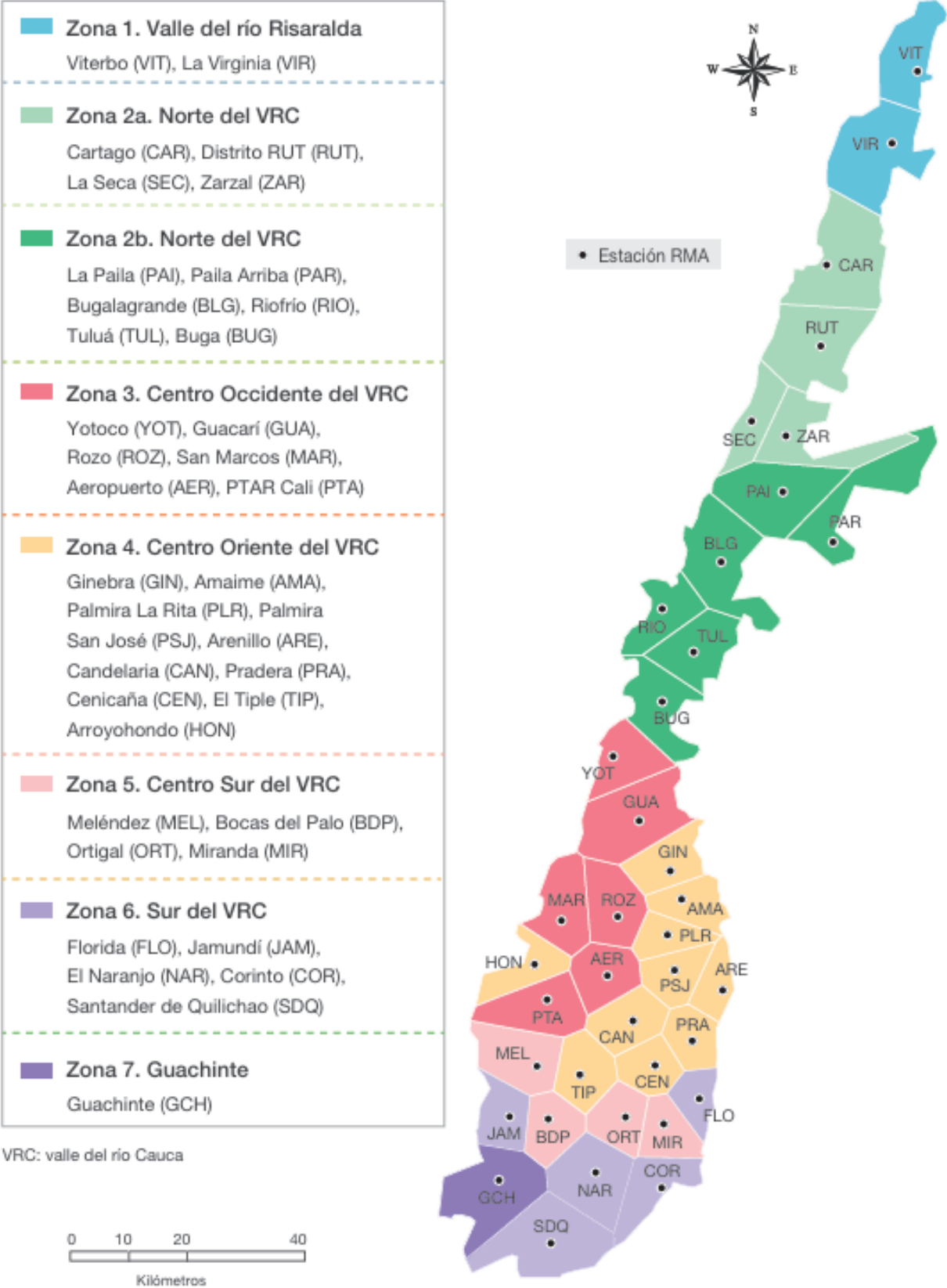


Figura 1. 7 Estaciones que conforman la Red Meteorológica Automatizada (RMA) de CENICAÑA.
Fuente: Cenicaña, (2023)

En la primera fase, se carga el Shapefile del área de estudio en *Google Earth Engine* (GEE). A continuación, se selecciona la colección de datos Terraclimate, definiendo el periodo de análisis y filtrando las variables climáticas necesarias, como la evaporación y la precipitación. Después, se procesan los datos aplicando funciones de reducción espacial para obtener estadísticas dentro del área de interés. Finalmente, los resultados se exportan en formato CSV, para su posterior análisis y ajustes de precisión de los datos.

Para el periodo de 1993 a 2022 se utilizó la información recolectada por las estaciones de la Red Meteorológica Automatizada (RMA) de Cenicaña (2023), que cuenta con registros desde 1993 hasta la fecha. Como se muestra en la Figura 1.7, estas estaciones están ubicadas estratégicamente para cubrir la mayor parte del área sembrada con caña de azúcar en el valle del río Cauca, que, a su vez, forma un área importante de la CARC. Es importante destacar que la precisión de esta información se ve incrementada por la distribución estratégica de las estaciones y la cantidad de registros, lo que permite obtener un análisis más representativo y fiable de las condiciones climáticas en la región.

4. Determinación de la precipitación efectiva

La precipitación efectiva (Pe) se define como la fracción de la precipitación total que llega hasta el suelo y que puede ser aprovechada por el cultivo (Doorenbos y Pruitt, 1992). Cuando esta precipitación participa en el cálculo de los requerimientos de riego de un cultivo, se utilizan datos de precipitación mensual de 10 años o más y se expresa en mm/mes, con una probabilidad de ocurrencia de 75% (Cruz, 2015). Para su cálculo, se sigue la siguiente metodología establecida realizada por Cruz (2015):

- **a) Recopilación de datos climáticos:** Se utilizaron datos de precipitación provenientes de las estaciones meteorológicas de Cenicaña y registros geospaciales de precipitación mensual multianual correspondientes a la CARC.
- **b) Ordenación de los datos:** Los datos se organizaron de menor a mayor, facilitando la identificación de tendencias y permitiendo la clasificación de los datos según su magnitud.
- **c) Asignación de frecuencias:** A cada valor de precipitación anual se le asignó un número de orden, que luego se utilizó para calcular la frecuencia relativa (F) de cada valor, aplicando la fórmula:

$$F = \left(\frac{m}{n + 1} \right) * 100$$

donde m es el número de orden asignado y n es el número total de eventos registrados.

- **d) Cálculo de la frecuencia relativa:** Con los datos ordenados, se calculó la frecuencia relativa de cada valor de precipitación, lo que proporciona una estimación de la probabilidad de ocurrencia de cada evento.
- **e) Representación gráfica:** Se elaboró un gráfico de dispersión que relaciona la precipitación anual con la frecuencia relativa. Este

gráfico permitió visualizar la relación entre la cantidad de precipitación y su probabilidad de ocurrencia.

- **f) Ajuste de la curva de tendencia:** Se trazó una línea de tendencia en el gráfico de dispersión y se obtuvo la ecuación de la línea de mejor ajuste. Esta ecuación se utilizó para estimar la precipitación correspondiente a una frecuencia determinada, generalmente el 75% de probabilidad de ocurrencia.
- **g) Estimación de la precipitación anual ajustada:** A partir de la ecuación de la curva de tendencia, se calculó la precipitación anual para una frecuencia del 75%, lo que representa una condición climática esperada en tres de cada cuatro años.
- **h) Ajuste de la precipitación mensual:** El valor ajustado de la precipitación anual se dividió entre la precipitación media anual para obtener un factor de corrección. Este factor se aplicó a los valores de precipitación de cada caño, ajustándolos a una probabilidad del 75%.
- **i) Corrección por estacionalidad:** Finalmente, los valores ajustados de precipitación mensual se corrigieron mediante un factor de escurrentía de 0.9 para los meses secos y 0.8 para los meses lluviosos, obteniendo así la precipitación efectiva mensual bajo condiciones específicas de manejo del agua y del clima.

5. Análisis de requerimiento hídrico para el cultivo de caña de azúcar

Los requerimientos hídricos de un cultivo (CWR, por sus siglas en inglés) se expresan en términos de evapotranspiración del cultivo (ETc), definida como el proceso combinado mediante el cual el agua se transforma en vapor desde formas líquidas o sólidas a través de la evaporación. Este proceso abarca la pérdida de agua desde el suelo, las superficies húmedas y los tejidos internos de las plantas (Allen et al., 2006). La ETc también se conoce como uso consuntivo o consumo de agua del cultivo.

La ETc se determina a partir del factor del cultivo (Kc) y la evapotranspiración potencial o de referencia (ETo). Esta última representa la tasa de evapotranspiración que ocurre desde una superficie de referencia, típicamente cubierta de pasto, bajo condiciones de abastecimiento hídrico adecuado. Dado que esta cubierta vegetal no está sujeta a restricciones hídricas, la ETo no se ve afectada por las condiciones del suelo, sino principalmente por factores climáticos, como la temperatura, el viento, la radiación solar, el período de luz del día, la humedad ambiental y la precipitación. Generalmente, esta medida se calcula utilizando la ecuación de Penman-Monteith, un método estandarizado desarrollado por la FAO que considera tanto variables fisiológicas como aerodinámicas (Allen et al., 2006).

Así, para ajustar la ETo a las necesidades específicas de un cultivo en particular, se emplea el coeficiente del cultivo (Kc). Este coeficiente varía según el tipo de cultivo, su fase de crecimiento y las condiciones ambientales (Figura 1.8). Por lo tanto, mientras que ETo actúa como un indicador de la demanda climática, el valor de Kc fluctúa principalmente en función de las características particulares del cultivo, variando solo en menor medida según las condiciones climáticas (Allen et al., 2006).

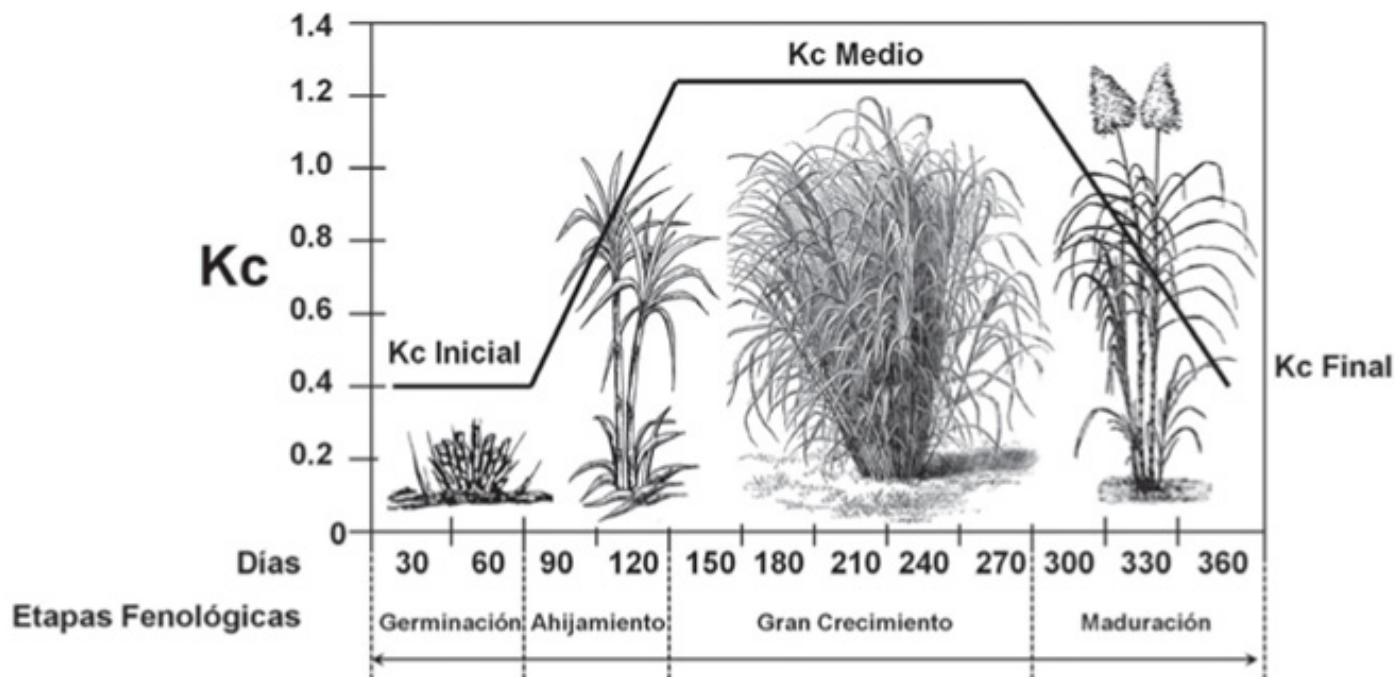


Figura 1. 8 Curva generalizada de coeficiente de cultivo K_c
Fuente: Allen et al., (2006)

En conclusión, la ET_c se determina multiplicando la evapotranspiración de referencia (ET_o) por el coeficiente del cultivo (K_c), como se presenta en la Ecuación 1. Se asume que las necesidades de agua del cultivo están plenamente satisfechas, por lo que la evapotranspiración real del cultivo (ET_c) será igual al CWR: $ET_c = CWU$ (Hoekstra et al., 2011).

Ecuación 1.1. Ecuación general para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c)

$$ET_c = K_c \cdot ET_o$$

Por otra parte, de acuerdo con Cruz, (2015), autores encontraron en el valle geográfico del río Cauca una relación lineal significativa entre la evapotranspiración (ET) y la evaporación (E), lo que permite calcular la ET_c a partir de la evaporación medida en tanque clase A¹⁰. Por lo tanto, el cálculo de la ET_c está dado por la multiplicación de el valor de la evaporación media mensual multianual por el factor K (Ver Ecuación 1), definido como la relación entre la evapotranspiración actual (E) y la evaporación medida en el tanque clase A (E).

Ecuación 1.2. Ecuación propuesta por CENICAÑA para calcular la evapotranspiración del cultivo de caña de azúcar.

$$ET_c = K \cdot E$$

Según Cruz (2015), el factor K varía en función de la edad del cultivo de caña de azúcar, como se muestra en la Tabla 1.3. Su valor

Valor K	Edad (meses)
0,3	1 – 3
0,4	3–Apr
0,6	4 – 5
0,7	5-Jun
0,8	6 – 8
0,7	8 – 9
0,6	9-Nov

Tabla 1.3 Coeficiente de Cultivo (K) para Caña de Azúcar en Función de la Edad del Cultivo, Basado en la Relación ET/E del Tanque Clase A
Fuente: Cruz (2015)

máximo se alcanza entre los 6 y 8 meses del cultivo, con un valor de 0,8. En este análisis será utilizado el valor crítico del factor K .

1.3.1 Cálculo de la Huella Hídrica Verde

La HH_{verde} se define como la relación entre el agua utilizada por el cultivo proveniente de la precipitación y el rendimiento del cultivo (Hoekstra et al., 2011). Es decir, corresponde al volumen de agua de lluvia que es absorbida y utilizada por el cultivo. Esta cantidad de agua se asocia con la precipitación efectiva, lo que implica que la HH_{verde} puede interpretarse como la proporción entre la precipitación efectiva en la zona donde se cultiva y el rendimiento del cultivo (Ovalle, 2012). En resumen, el agua verde hace referencia exclusivamente a la fracción de la evapotranspiración cubierta por la lluvia.

10. Los factores de clima que afectan la evaporación en una superficie de agua libre son los mismos que controlan la transpiración desde la superficie de las hojas. Por lo tanto, la evaporación en el tanque clase A es un buen estimativo de la evapotranspiración actual (ET) de la caña, y es utilizada con éxito en Sudáfrica, Taiwán, Hawái y Colombia (Torres et al., 2004).

En términos de la cuantificación, la evapotranspiración verde ET_{verde} corresponde al valor mínimo entre la evapotranspiración del cultivo y la precipitación efectiva (ver Ecuación 3). La ET_{verde} también es denominada como el requerimiento de agua del cultivo verde (RAC) (Renderos, 2014).

Ecuación 1.3. Ecuación para el cálculo de la evapotranspiración verde

$$ET_{verde} = \min(ET_c, P_{efec})$$

Donde,

ET_c = Evapotranspiración total del cultivo

P_{efec} = Precipitación efectiva

Una vez obtenida la ET_{verde} en mm, se convierte a m^3/ha aplicando el factor 10 como se indica en la siguiente ecuación. De este modo, se obtiene el requerimiento de agua verde del cultivo CWU_{verde} .

Ecuación 1.4. Ecuación para el cálculo del requerimiento del cultivo (CWU)

$$CWU_{verde} = ET_{verde} * 10$$

Donde, 10 = representa el factor de conversión que permite incorporar la evapotranspiración en mm y el área sembrada en ha para obtener la huella hídrica azul en m^3 .

Finalmente, como se presenta en la Ecuación 5 la HH_{verde} se calcula dividiendo los requerimientos de agua verde CWU_{verde} por el rendimiento del cultivo (Y) en toneladas por hectárea. Esta fórmula determina cuánta agua verde se utiliza por cada tonelada de producción de caña de azúcar.

Ecuación 1.5. Ecuación del cálculo de la Huella Hídrica Verde HH_{verde}

$$HH_{verde} = CWU_{verde} / Y \quad \text{Ecuación 5.}$$

1.3.2 Cálculo de la Huella Hídrica Azul

La HH_{azul} de un cultivo se refiere al volumen de agua de riego requerido para compensar el déficit hídrico que no es cubierto por la precipitación natural, es decir, la cantidad de agua que el cultivo necesita adicionalmente a la precipitación efectiva HH_{verde} . En este contexto, la evapotranspiración azul del cultivo (ET_{azul}) se define como la porción de la demanda evaporativa que no es satisfecha por la precipitación, y que debe ser suplida mediante riego. Este concepto también se denomina el requerimiento hídrico azul del cultivo (RAC_{azul}), ya que refleja la cantidad de agua de riego necesaria para asegurar el desarrollo óptimo del cultivo en condiciones de déficit hídrico (Allen et al., 2006; Renderos, 2014)

Por lo tanto, la ET_{azul} corresponde al valor máximo entre la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo y la precipitación efectiva (Ver Ecuación 6). Sin embargo, si la P_{efec} es mayor o igual a

la evapotranspiración del cultivo, la ET_{azul} es cero, ya que las necesidades hídricas del cultivo fueron completamente satisfechas por la precipitación, eliminando la necesidad de uso de agua adicional. La ET_{azul} se calcula para cada año de análisis de acuerdo con los datos recolectados evaporación y precipitación anual.

Ecuación 1.6. Ecuación para el cálculo de la evapotranspiración azul del cultivo (ET_{azul})

$$ET_{azul} = \max(0, ET_c - P_{efec})$$

Donde,

• ET_c = Evapotranspiración total del cultivo

• P_{efec} = Precipitación efectiva

La ET_{azul} expresada en mm, se convierte a m^3/ha aplicando el factor de conversión 10. De esta manera, se obtiene el Uso de Agua del Cultivo Azul CWU_{azul} , por sus siglas en inglés, Crop Water Use Blue), y se calcula por la acumulación de evapotranspiración diaria (ET, mm/día) durante todo el período de crecimiento (Hoekstra et al., 2011).

Ecuación 1.7. Ecuación para el cálculo uso del agua del cultivo (CWU)

$$CWU_{azul} = 10 * \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{azul}$$

La suma se realiza durante el período desde el día de la siembra (día 1) hasta el día de la cosecha (l_{gp} significa duración del período de crecimiento en días). Finalmente, el cálculo HH_{azul} en m^3/t , se realiza a partir de la división entre el CWU_{azul} , en m^3/ha y el rendimiento del cultivo (Y) en t/ha , como se presenta en la siguiente ecuación:

Ecuación 1.8. Ecuación para el cálculo de la Huella Hídrica Azul (HH_{azul})

$$HH_{azul} = \frac{CWU_{azul}}{Y}$$

Por otra parte, según la metodología de la UNESCO-IHE, se aplica el concepto de Uso de Agua del Cultivo (UAC), definido como el volumen total de agua utilizada para producir una cantidad específica de toneladas de un cultivo. En este estudio, se realizará el cálculo con el fin de complementar el análisis. En este contexto:

Ecuación 1.9. Ecuación para el cálculo del Uso de Agua del Cultivo (UAC).

$$UAC = RAC * \frac{\text{Producción}}{\text{Rendimiento}}$$

El RAC se refiere a los requerimientos de agua de cada cultivo, medidos a nivel de campo (m^3/ha); la Producción es el volumen total de cultivo obtenido durante un año (ton/año); y el Rendimiento representa el volumen de producción del cultivo por unidad de área de producción (ton/ha).

1.3.3 Cálculo de la Huella Hídrica Gris

La HH_{gris} se define como el volumen de agua dulce requerido para diluir o asimilar una carga de contaminantes que ingresan a un cuerpo de agua, teniendo en cuenta la concentración natural del contaminante y los valores estándar establecidos por las normativas de calidad del agua (Vázquez y Buenfil, 2012; Franke et al., 2013).

En la agricultura, este concepto está relacionado con la lixiviación de sustancias químicas, que depende de factores ambientales y las prácticas agrícolas implementadas. Los principales contaminantes utilizados para el cálculo de la HH_{gris} incluyen fertilizantes, principalmente nitrogenados y fosforados, pesticidas, herbicidas y metales (Franke et al., 2013). En este contexto, la HH_{gris} refleja la presión que ejerce la agricultura, especialmente en sistemas de producción agrícola, como los monocultivos, que hacen un uso intensificado de fertilizantes sintéticos y agroquímicos. Para su cálculo, se seguirá el método propuesto por Hoekstra et al., (2011), considerando el impacto específico de los fertilizantes y herbicidas.

La HH_{gris} en general es el resultado de la división de la carga de un contaminante (L), sobre la diferencia entre el estándar de calidad de agua propuesto para dicho contaminante (C_{max}) y la concentración de este en un cuerpo de agua en el caso de no presentarse una alteración antrópica (C_{nat}) (Hoekstra et al., 2011; Franke et al., 2013).

Ecuación 1.10. Ecuación para el cálculo de

la Huella Hídrica Azul HH_{gris}

$$HH_{gris} = \frac{L}{(C_{max} - C_{nat})}$$

Dado que la contaminación de las tierras agrícolas se clasifica como contaminación difusa, la carga (L) en el sistema de agua dulce está determinada por la fracción de sustancia química aplicada en el campo que finalmente llega a dicho sistema. Por lo tanto, es necesario conocer la cantidad de nitrógeno aplicado en el campo (Appl) y la fracción de lixiviación y escorrentía (α). La carga (L) se calcula utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 1.11. Ecuación para el cálculo de la carga contaminante (L).

$$L = \alpha * Appl$$

Finalmente, se tiene que la ecuación general para el cálculo de la HH_{gris} anual esta dada por la siguiente ecuación.

Ecuación 1.12. Ecuación para el cálculo de

la Huella Hídrica Gris HH_{gris}

$$HH_{gris} = \frac{\alpha * Ta / (C_{max} - C_{nat})}{Y}$$

Donde,

- α : coeficiente de escorrentía de lixiviación o fracción de fertilizante que logra infiltrarse hacia cuerpos de agua
- Ta: la tasa de aplicación química (kg/ha).
- C_{max} : la tasa de aplicación química (kg/m³),
- C_{nat} : concentración natural del contaminante en los cuerpos de agua (kg/m³)
- Y: rendimiento del cultivo en unidades de masa sobre área (ton/ha)

Al evaluar la HH_{gris} de una actividad o proceso, es necesario calcular por separado la HH_{gris} para cada contaminante (sustancia química) involucrado. La HH_{gris} general corresponde al valor más alto de las huellas hídricas grises específicos para cada contaminante, según lo indicado por Franke et al. (2013). Por lo tanto, a continuación, se detalla el procedimiento de cálculo de la HH_{gris} específica tanto para fertilizantes como para herbicidas, de manera individual.

Cálculo de la huella hídrica por la aplicación de fertilizantes

Para este cálculo, se utilizó la cantidad recomendada de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) para el cultivo de caña de azúcar en la región. Los valores típicos de uso de fertilizantes se definieron con base en investigaciones de Cenicaña y en las dosis comúnmente empleadas por los productores locales (ver Tabla 1.4). En este estudio se utilizó el valor máximo aplicado para cada elemento.

Elemento	Cantidad de uso de fertilizante (kg/ha)	Porcentaje de elemento en fertilizante
Nitrógeno (N)	60 - 175	46%
Fosforo (P)	30 - 50	46%
Potasio (K)	30 - 60	60%
Total	285	

Tabla 1.4 Recomendaciones de fertilizantes para la caña de azúcar en suelos de la parte plana del Valle del río Cauca
Fuente: : Quintero (1993, 1997, 1999) y Cenicaña (2023)

El valor de T_a se calculó para cada elemento del fertilizante N-P-K, multiplicando la cantidad aplicada por el porcentaje de cada elemento en el fertilizante. Debido a la falta de datos específicos sobre el porcentaje de lixiviación en el cultivo hasta alcanzar cuerpos de agua dulce, se asumió el valor propuesto por Hoekstra et al., (2011) del 10% para todos los fertilizantes, con $\alpha=0,1$. La concentración natural del contaminante C_{nat} , que se refiere a la concentración en el cuerpo de agua sin intervención humana, se asumió como cero siguiendo lo planteado por Doorenbos et al., (1979), FAO (2013) y Renderos (2014), dado que representa la concentración de productos químicos en una fuente de agua natural.

Elemento	C _{max} (mg/l)	Cultivo	País	Fuente
Nitrógeno (N)	2	Café	Colombia	(Echeverri et al., 2021)
	2	Arroz	China	(Wu et al., 2021)
	0,8	Caña de azúcar	Brasil	(Scarpore et al., 2016)
	2,25	Papa	Colombia	(Amézquita y Motta, 2015)
	11,3	Maíz	España	(Chukalla et al., 2018)
	3,5	Producción agrícola	Irán	(Jamshidi et al., 2022)
Fosforo (P)	0,25	Producción agrícola en una cuenca	Irán	(Jamshidi et al., 2022)
Potasio (K)	12	Maíz	China	(Yu et al., 2024)

Tabla 1.5 Concentraciones máximas permisibles en la agricultura de los elementos NPK (mg/L)

Fuente: : elaboración propia

Las concentraciones máximas admisibles de cada fertilizante (C_{max}) se determinaron consultando y comparando normas internacionales vigentes, debido a la falta de información clara en la normativa nacional. Adicionalmente, se revisaron estudios nacionales sobre el cálculo de la HH_{gris} en la fertilización agrícola. Para este estudio, el valor de C_{max} utilizado fue 2 mg/l. En la Tabla 1.5 se presentan los valores obtenidos para la agricultura a partir de diversos estudios.

De esta manera, el cálculo de la HH_{gris} se realizó aplicando directamente la Ecuación 11. El elemento que necesite una mayor cantidad de agua para llegar a su concentración natural será el que determine el valor de la HH_{gris} (Franke et al., 2013; Hoekstra et al., 2011).

Cálculo de la huella gris por herbicidas

Para la estimación de la HH_{gris} asociada a los herbicidas, se adoptó la misma metodología desarrollada por Franke et al., (2013) utilizada para el cálculo de la HH_{gris} en fertilizantes. No obstante, es fundamental comprender previamente los términos específicos y el método de determinación correspondiente, ya que estos son diferentes para los herbicidas. Sin embargo, los factores seleccionados para el cálculo se basaron en estudios locales realizados en diversos cultivos y en normativas internacionales, dado que en Colombia existe una limitada disponibilidad de información sobre las concentraciones naturales de contaminantes y una escasa regulación respecto a las concentraciones máximas permisibles. Esta falta de datos, junto con la variabilidad en la aplicación de productos químicos —influenciada por factores como las características edafológicas del suelo y las prácticas de manejo agrícola— presenta un desafío considerable para la obtención de los insumos necesarios para estos cálculos.

Para este cálculo, se utilizó la cantidad recomendada de herbicidas para el cultivo de caña de azúcar en la región. Los valores típicos se definieron con base en investigaciones de Cenicaña y en las dosis

Elemento	Cantidad de uso de herbicida (l/ha)	Cantidad de i.a (g/L)
Ametrina	2,5	500
2,4 D	1,5	720
Diuron	1,5	800
Glifosato	1,5	480

Tabla 1.6 Valor máximo aplicado de herbicidas para la caña de azúcar en Valle del río Cauca

Fuente: Gómez, 1995

Nota: Los valores de ingrediente activo (i.a.) corresponden a la composición declarada en el etiquetado de cada herbicida por formulaciones comerciales

comúnmente empleadas por los productores locales (ver Tabla 1.6). En este estudio se utilizó el valor máximo aplicado para cada elemento.

Determinación de la fracción de lixiviación-escorrentía (α): de acuerdo con la metodología, para estimar la fracción de lixiviación-escorrentía es fundamental asignar un peso a los distintos factores que afectan el potencial de lixiviación del agroquímico en estudio. No obstante, ante la ausencia de datos específicos locales, estos valores se determinaron utilizando bases de datos globales y referencias bibliográficas internacionales. Así, dichos valores se establecieron con base en mapas, bases de datos globales y referencias internacionales, siguiendo las directrices y el manual de contabilidad de HH_{gris} desarrollado por Franke et al. (2013).

Determinación de la concentración máxima admisible (C_{max}): para la determinación de las concentraciones máximas admisibles para cada uno de los pesticidas se consultaron normas internacionales vigentes (Tabla 1.7):

Pesticida	Cmax (µg/l)	Fuente
2,4 D	4	(Conselho Nacional do Meio Ambiente- CONAMA, 2011)
Atrazina	2	(OMS, 2006)
Glifosato	800	Franke, et al. (2013)

Tabla 1.7 Concentraciones máximas permisibles de pesticidas para agua potable
 Fuente: elaboración propia

Determinación de la concentración máxima admisible (C_{nat}): Se asumió que las concentraciones naturales (C_{nat}) eran cero en el área ya que los pesticidas no se encuentran naturalmente en el medio ambiente.

1.4 Resultados y discusión

1.4.1 Huella Hídrica Verde y Azul del cultivo de caña de azúcar¹¹

En la Figura 1.9 se presentan los datos de Precipitación efectiva (Pe) y evapotranspiración del cultivo (ETc) de la caña de azúcar en la CARC normalizada. Se observa que, a mayor precipitación efectiva, la ETc disminuye ligeramente, ya que la mayor cantidad de agua en el suelo reduce la necesidad de transpiración de las plantas para compensar la falta de humedad. Esta relación, sin embargo, puede estar influenciada por otros factores climáticos y edafológicos específicos de las diferentes zonas.

Un comportamiento similar se observa en la Figura 1.10, que muestra la relación entre la precipitación efectiva y el uso de agua en el cultivo de caña de azúcar (UAC). En esta figura se evidencia que,

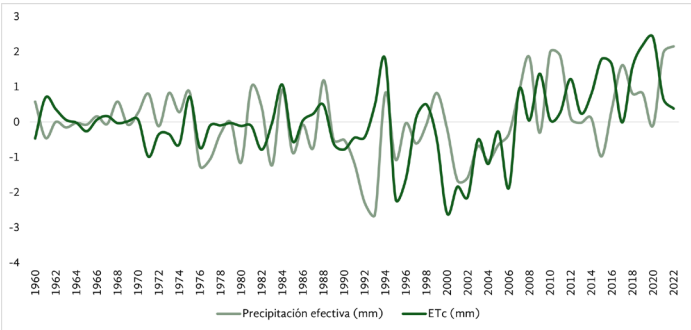


Figura 1. 9 Relación entre Precipitación efectiva y Evapotranspiración del cultivo (1960-2022)

Fuente: Elaboración propia con base en datos climáticos de TerraClimate (2023) para el período 1960-1993, y datos climáticos de CENICAÑA (2023) para el período 1994-2022. Los datos de área sembrada y rendimiento se obtuvieron de la base de datos del proyecto en desarrollo

Nota: Las series de precipitación y ETc se presentan normalizadas alrededor de la media y su desviación estándar, de manera que se pueda observar la relación entre ellas convertidas a una misma unidad o expresión de análisis

a menor precipitación anual, aumentan las necesidades hídricas del cultivo, haciendo que el déficit de agua deba ser compensado con fuentes externas, como aguas superficiales o subterráneas, mediante sistemas de riego.

Con base en estos datos, se determinó la HH azul y verde del cultivo de caña de azúcar, cuyos resultados se presentan en la Figura 1.11. En esta, se puede evidenciar que la HH_{verde} del cultivo de caña de azúcar es mayor que la HH_{azul} durante la mayor parte del periodo analizado, lo que indica que la mayoría del requerimiento hídrico del cultivo es cubierto por el agua proveniente de la precipitación natural

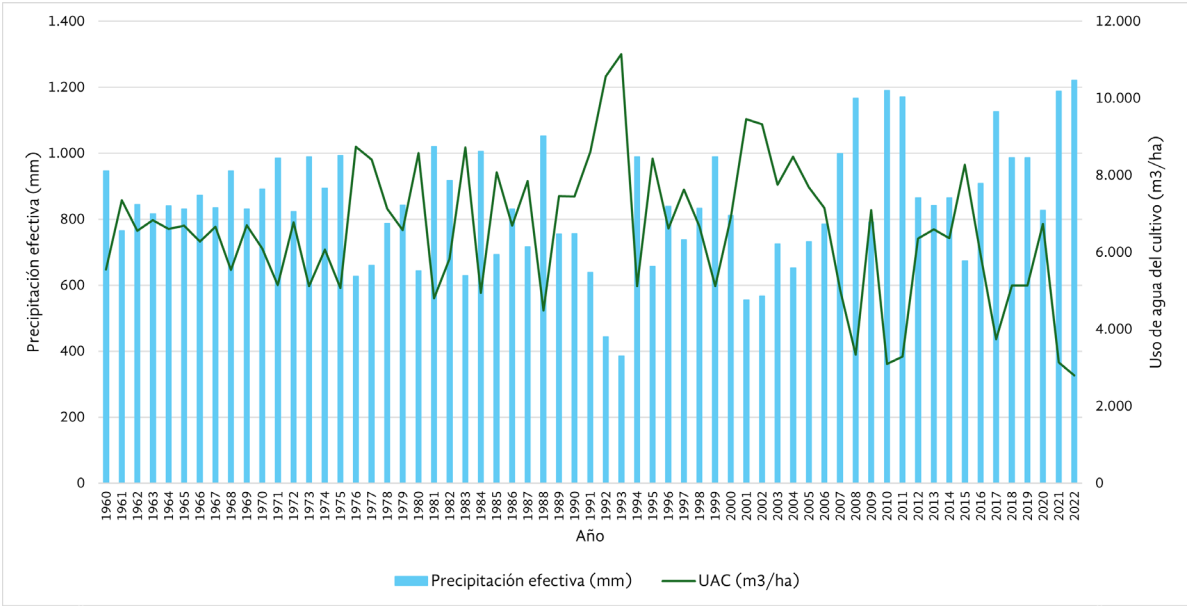


Figura 1. 10 Relación entre la precipitación efectiva y el uso de agua para el cultivo de la caña de azúcar (UAC)
 Fuente: Elaboración propia con base en datos climáticos de TerraClimate (2023) para el período 1960-1993, y datos climáticos de CENICAÑA (2023) para el período 1994-2022. Los datos de área sembrada y rendimiento se obtuvieron de la base de datos del proyecto en desarrollo.

11. Las bases de datos de estos resultados se pueden observar en el Anexo 2: “Huella Hídrica del cultivo de Caña de azúcar en la CARC”

(HH_{verde}). Sin embargo, en años específicos como 1992, 2015 y 2016, cuando la precipitación fue menor, se incrementó la demanda de agua de fuentes superficiales o subterráneas (HH_{azul}), lo cual se refleja en picos más pronunciados en esos años.

En la Figura 1.11, las tendencias de la HH_{verde} y la HH_{azul} durante el período de estudio revelan diferencias marcadas. La HH_{verde} ha mostrado un crecimiento sostenido, con una tasa promedio anual muy elevada del 11.47%, que le permitió pasar de 514.1 Hm³ en 1960 a 4.169 Hm³ en 2022, reflejando un aumento desorbitado en el uso de agua proveniente de precipitaciones naturales, identificando el claro papel de la naturaleza como recurso central para esta actividad económica. En contraste, la HH_{azul} ha tenido un comportamiento más variable, con períodos de descensos y repuntes, pero con una tendencia general a crecer a una tasa anual de 3,5%. Estos resultados muestran una fuerte dependencia del cultivo de caña de azúcar de las precipitaciones naturales (HH_{verde}), que han sido la principal fuente de agua a lo largo del tiempo. No obstante, aunque el uso de agua superficial y subterránea (HH_{azul}) ha registrado menor crecimiento, su dinámica sigue siendo alta, lo que evidencia su importancia en el incremento de la producción y la productividad de la caña de azúcar. Esta realidad pone de manifiesto la vulnerabilidad del sistema frente a la variabilidad climática, ya que cualquier disminución en las precipitaciones, intensifica la dependencia, el uso y la extracción de las fuentes de agua superficial y subterránea.

En un análisis más específico, se observa que, durante las primeras décadas analizadas (1960-1989), la HH_{verde} mostró un crecimiento sostenido, con tasas que oscilaron entre 3.32% y 4.98%. Por su parte, la HH_{azul} presentó picos iniciales de crecimiento del 8.31% y 5.75%, lo que sugiere una dependencia significativa de fuentes hídricas externas en ese período. Sin embargo, entre 1990 y 2019 se evidenció una variabilidad notable. La HH_{verde} alcanzó un crecimiento significativo del 7.91% en la década de 1990, pero este se redujo a casi nulo (0.05%) en los años 2000, antes de retomar un aumento moderado del 1.54% en la última década. Por otro lado, la HH_{azul} , que experimentó una disminución del -0.59% en la década de 1990, mostró una recuperación notable con un crecimiento del 13.09% entre 2010 y 2019, reflejando una creciente presión sobre los recursos hídricos.

En relación con la suma de la HH Verde y Azul ($HH_{verde} + HH_{azul}$), durante el período 1960-2022 se observa un crecimiento promedio anual de 66.63 Hm³, lo que equivale a un incremento elevado del 9.1% anual respecto al valor inicial de 733.8 Hm³ en 1960. Este crecimiento sostenido refleja cómo la expansión del área cultivada y el aumento de la producción han incrementado el uso total de agua, consolidando este recurso como un factor crítico para la productividad agrícola. Asimismo, la disponibilidad y manejo del agua en la región se han beneficiado de infraestructuras mejoradas y políticas públicas que han permitido sostener este crecimiento, respondiendo a las demandas crecientes de la industria y fortaleciendo su sostenibilidad empresarial.

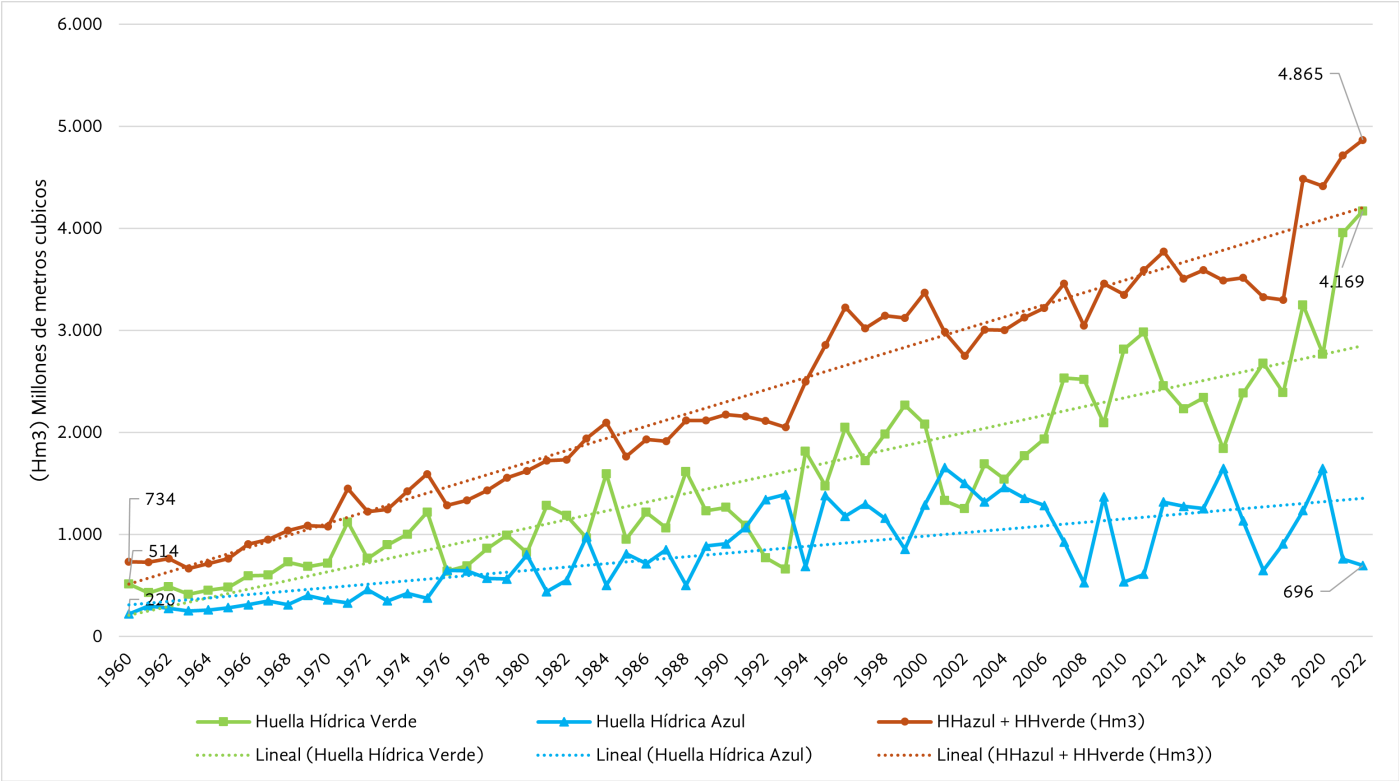


Figura 1. 11 Relación de la Huella Hídrica Verde, Azul y su Suma Total en el Cultivo de Caña de Azúcar en la CARC (1960-2022)

Fuente: : Elaboración propia con base en datos climáticos de TerraClimate (2023) para el período 1960-1993, y datos climáticos de CENICAÑA (2023) para el período 1994-2022. Los datos de área sembrada y rendimiento se obtuvieron de la base de datos del proyecto en desarrollo (Volumen N°. 1)

Un resultado similar se observa en la Figura 1.12, que presenta la HH expresada en metros cúbicos por tonelada (m^3/ton). Los datos muestran una clara predominancia de la HH verde sobre la azul. Además, se puede notar un aumento en la HH_{azul} en momentos en que la HH_{verde} disminuye, lo cual como se mencionó anteriormente, muestra que la dependencia de recursos hídricos alternativos se intensifica cuando la disponibilidad de agua de lluvia es limitada. Y, este es un elemento fundamental pues la HH_{azul} es la que genera mayores costos de oportunidad, pues la captación de agua superficial y subterránea para el riego de caña no le permite al recurso ser empleado para otros usos humanos y además para el caudal ecológico. Esta realidad es la que genera conflictos e impactos ambientales asociados a ese costo de oportunidad de la apropiación del agua para el uso de un sector económico, en este caso la caña de azúcar.

En comparación con estudios internacionales y locales sobre la HH del cultivo de caña de azúcar, se observa una tendencia similar en la predominancia de la huella verde sobre la azul. Sin embargo, HH_{azul} presenta variaciones significativas en los diferentes estudios, lo que se atribuye a las condiciones específicas de localización del cultivo, incluyendo la disponibilidad de agua de lluvia, así como el acceso a recursos hídricos superficiales y subterráneos. Además, factores como las características del suelo, el clima y las prácticas agrícolas implementadas influyen en estas diferencias. De acuerdo con estudios locales, los resultados obtenidos en el presente análisis superan los hallazgos reportados por Restrepo y Bedoya (2015) para el cultivo de caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca, así como los publicados por Ramírez et al. (2022) en relación con la caña orgánica en la zona central del Valle del Cauca (ver Figura 1.13).

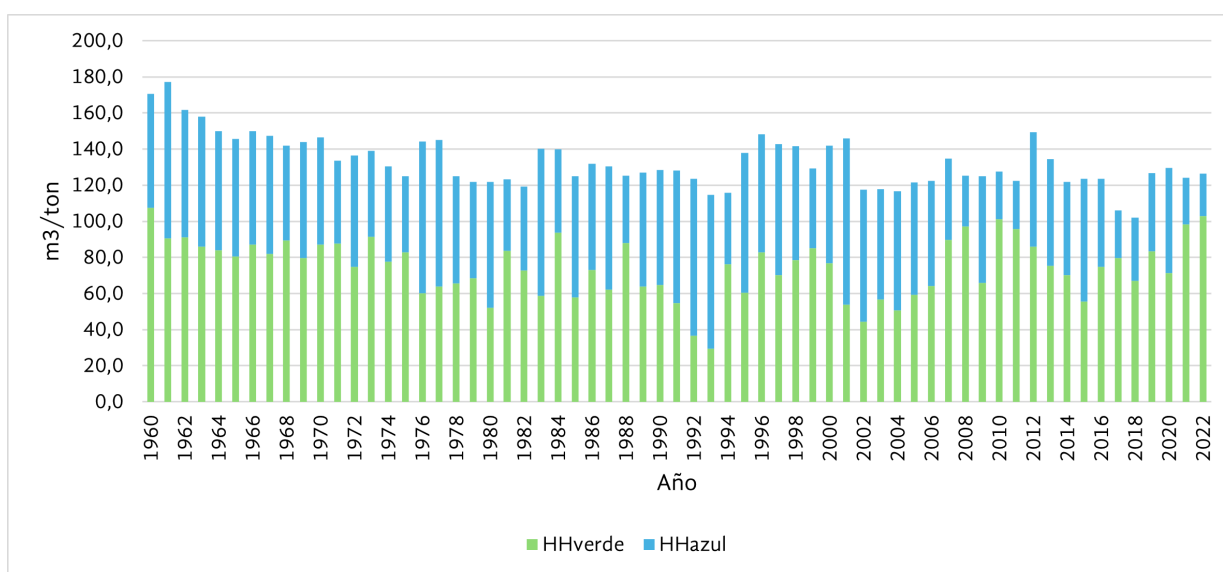


Figura 1.12 Relación de la Huella Hídrica Azul y Verde en metros cúbicos por toneladas

Fuente: : cálculos propios con base en datos climáticos de TerraClimate (2023) para el período 1960-1993, y datos climáticos de CENICAÑA (2023) para el período 1994-2022. Los datos de área sembrada y rendimiento se obtuvieron de la base de datos del proyecto en desarrollo.

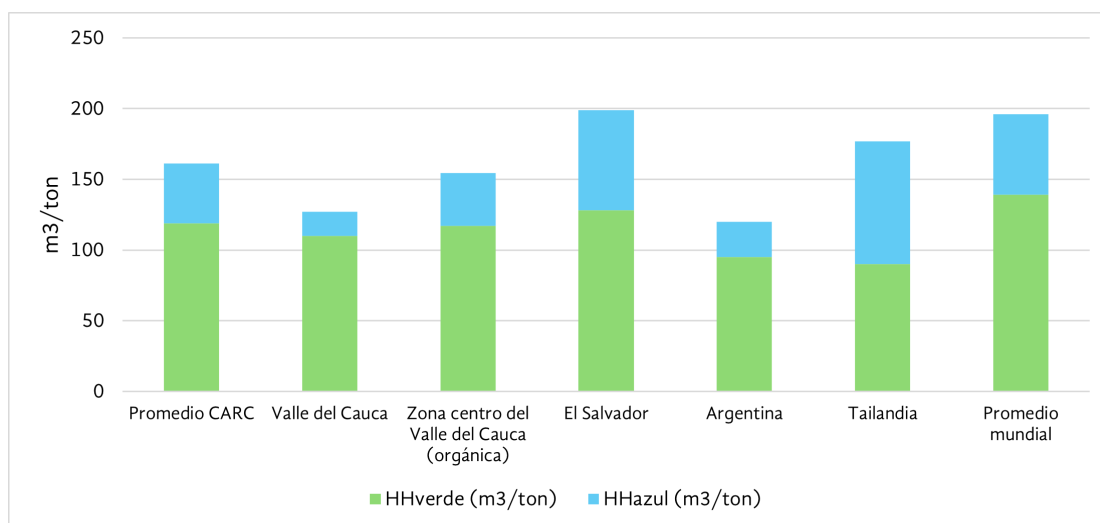


Figura 1.13 Comparación resultados de huella hídrica en relación a la producción en toneladas

Fuente: : Restrepo y Bedoya (2015) para el Valle del Cauca; Ramírez et al., (2022.) para orgánica; , Renderos, (2014), para El Salvador; Scarpate et al., (2016), para Argentina; Kongboon y Sampattagul, (2012) para Tailandia y Mekonnen y Hoekstra, (2011b) para el promedio mundial.

1.4.2 Huella Hídrica Gris

La HH_{gris} se calculó considerando los principales contaminantes derivados del manejo agrícola del cultivo de caña de azúcar. Para la fertilización, se incluyeron los nutrientes nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), mientras que para los pesticidas se evaluaron 2,4-D, glifosato, diurón y ametrina. Siguiendo la metodología descrita por Franke et al. (2013), la HH_{gris} general se determina seleccionando el valor más alto entre las HH_{gris} específicas calculadas para cada contaminante. Este enfoque identifica al contaminante más crítico como el principal contribuyente a la HH_{gris} general, representando la mayor presión sobre los recursos hídricos.

En este estudio, de acuerdo con la Figura 1.14 el nitrógeno y el pesticida 2,4-D, mostraron el mayor impacto potencial en la HH_{gris} , contribuyendo significativamente a la carga contaminante del sistema productivo. El nitrógeno obtuvo un valor de 4.025 m³, mientras que la del herbicida 2,4-D asciende a 712.800 m³. Esto revela una diferencia

notable en la HH_{gris} , evidenciando que, aunque ambos contribuyen significativamente a la contaminación del sistema productivo, el herbicida 2,4-D representa una carga contaminante 177 veces superior al del fertilizante nitrogenado. Estos resultados destacan el impacto sustancial del uso del 2,4-D en la carga de agua gris en comparación con el nitrógeno. Cabe señalar que en países como China su uso está prohibido (Donley, 2019).

Considerando sus diferencias significativas en los valores específicos de HH_{gris} , a continuación, se realizará el análisis del cálculo para estos dos componentes en forma separada. Este procedimiento es especialmente relevante dado que la mayoría de los estudios sobre HH_{gris} se enfocan exclusivamente en la contaminación por fertilizantes, dejando de lado el impacto de los herbicidas. Este análisis permitirá comprender en detalle el aporte individual de cada componente al impacto ambiental del cultivo y resaltar las disparidades en su presión sobre los recursos hídricos

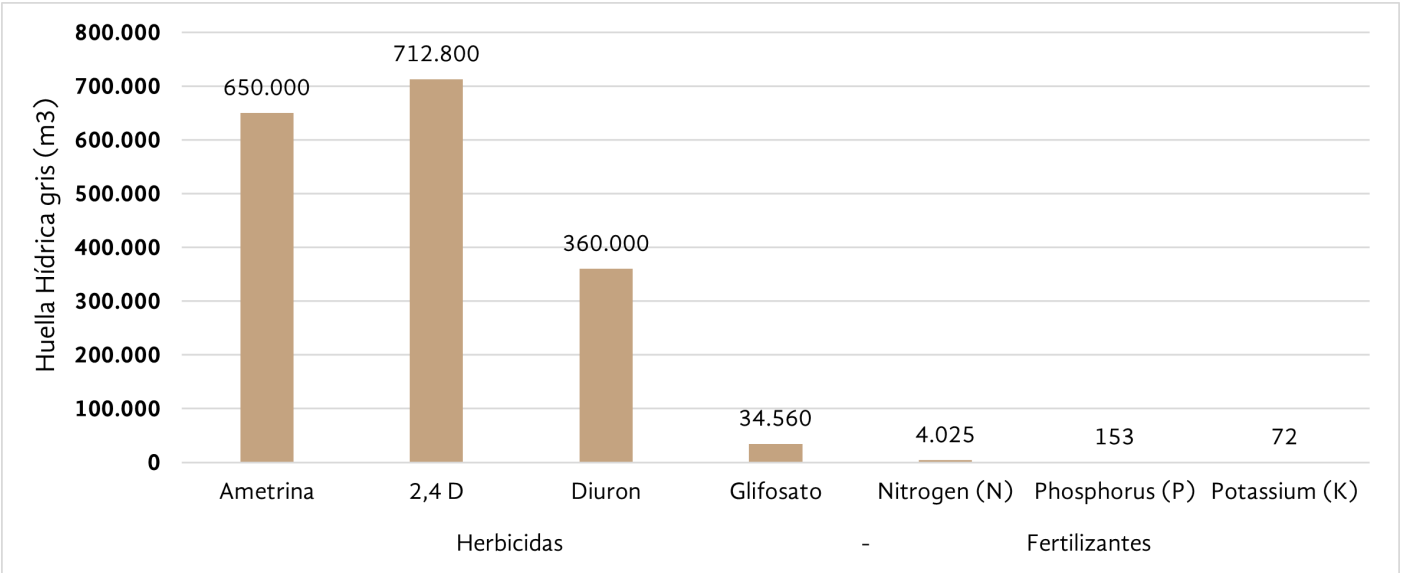


Figura 1.14 Huella Hídrica gris específica para cada contaminante (herbicidas y fertilizantes) en el cultivo de la caña de azúcar en la CARC Fuente: cálculos propios

Huella Hídrica Gris de la Aplicación de Nitrógeno en el Cultivo de Caña de Azúcar en la CARC (1960–2022)

Dado que la mayoría de los estudios sobre el cálculo de la huella hídrica gris se centran exclusivamente en los fertilizantes, este resultado proporciona una base sólida para realizar análisis comparativos con otros estudios y ampliar el conocimiento sobre la gestión hídrica en este cultivo. De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, la HH_{gris} del fertilizante nitrógenado en el cultivo de caña de azúcar en la CARC registró valores que fluctuaron entre 34 m³/ton y 46 m³/ton durante el período 1960-2022. Estos datos revelan una tendencia general de reducción a lo largo de las décadas, con un máximo de 46 m³/ton al inicio en 1960 y una estabilización cerca de los 35-40 m³/ton en las décadas posteriores, cerrando en 33,89 m³/ton en 2022 (ver Figura 1.15).

Al compararse estos resultados con estudios realizados en Brasil por Scarpore et al. (2016) y con el promedio mundial estimado por Mekonnen y Hoekstra (2011a), resulta mayor, ya que estos autores reportaron valores de 22 m³/ton y 13 m³/ton, respectivamente. Sin embargo, en estudios como el de Chukalla et al. (2018) se obtuvo que el uso de nitrógeno inorgánico con tasas altas de aplicación (300 kg N/ha) resultó en una HH_{gris} de 1100 m³/ton, en un cultivo de maíz. En contraste, en el presente análisis, la tasa de aplicación utilizada fue de 175 kg N/ha, lo cual se asocia a menores valores de HH_{gris} . Por su parte, cuando hablamos de la HH_{gris} Total para el cultivo de caña de azúcar en la CARC, que es la que verdaderamente mide la presión ambiental sobre un territorio o un recurso, en la Figura 1.16 se presenta esta asociada a la aplicación de fertilizantes nitrogenados, expresados en millones de metros cúbicos (Hm³).

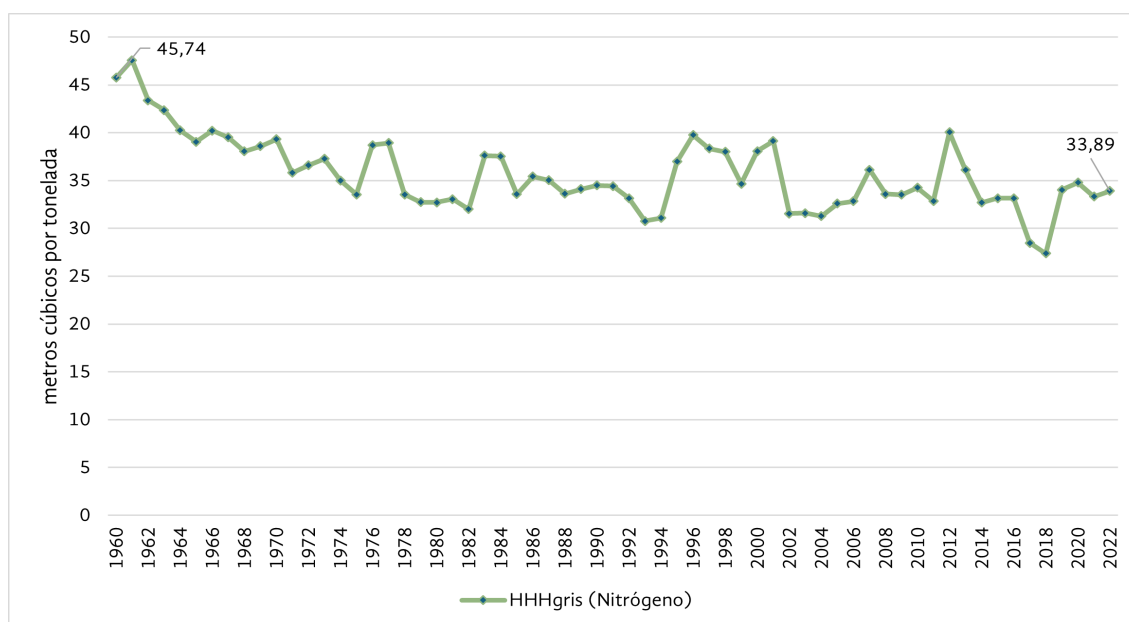


Figura 1. 15 Huella Hídrica Gris del cultivo de caña de azúcar por aplicación de nitrógeno en la CARC (m³/ton) (1960-2022)

Fuente: cálculos propios. Los datos de área sembrada y rendimiento se obtuvieron de la base de datos del proyecto en desarrollo

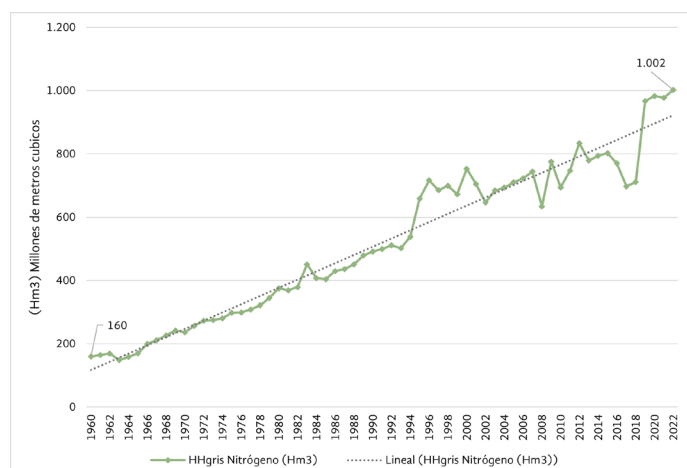


Figura 1.16 Huella Hídrica Gris del Cultivo de Caña de Azúcar en la CARC Asociada al Uso de Fertilizantes Nitrogenados (1960-2022)

Fuente: cálculos propios. Los datos de área sembrada y rendimiento se obtuvieron de la base de datos del proyecto en desarrollo

La HH_{gris} correspondiente al uso de fertilizantes nitrogenados en el cultivo de caña de azúcar en la CARC muestra un crecimiento absoluto significativo, aumentando de 159,5 Hm³ en 1960 a 1.002,2 Hm³ en 2022, lo que representa un incremento total de 842,7 Hm³ a lo largo del período analizado. Este crecimiento corresponde a un promedio anual de 13,6 Hm³ por año, o a una tasa de 8,5% anual, indicando una tendencia sostenida al alza en la presión hídrica asociada al manejo del nitrógeno. Durante el período inicial, el incremento fue moderado, con valores inferiores a 300 Hm³ en las primeras dos décadas, mientras que a partir de 1990 se observa un crecimiento más pronunciado, alcanzando valores superiores a los 700 Hm³ desde 2010.

Este comportamiento está relacionado con la intensificación agrícola, el aumento de áreas cultivadas y el uso más intensivo de insumos químicos, lo que subraya la necesidad de implementar estrategias de manejo más sostenibles para mitigar este impacto ambiental. Asimismo, el valor de la HH_{gris} está estrechamente relacionado con el elevado requerimiento nutricional del cultivo. En este contexto, el nitrógeno (N) se identifica como el nutriente más limitante para la producción de caña de azúcar en los suelos de la zona plana del valle del río Cauca (Cenicña, 2015). Esta condición incrementa la cantidad de fertilizantes nitrogenados aplicados, lo que a su vez eleva la lixiviación y el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, generando un impacto significativo en los recursos hídricos de la región.

Huella Hídrica Gris de la Aplicación de 2,4-D en el Cultivo de Caña de Azúcar en la CARC (1960–2022)

La aplicación de herbicidas, en particular el 2,4-D, ha generado un impacto significativo en la HH_{gris} del cultivo de caña de azúcar en la CARC durante el período 1960-2022. De acuerdo con la Figura 1.16, la HH_{gris} asociada a este pesticida es notablemente mayor en comparación con las huellas hídrica verde y azul, así como con la HH_{gris} derivada de la aplicación de fertilizantes nitrogenados. Frente a esta última, la HH_{gris} del herbicida 2,4-D la supera en 177 veces para 2022.

Este resultado, deja en descubierto el impacto desproporcionado del uso del 2,4-D en la contaminación hídrica. Si bien el 2,4-D es reconocido por su eficacia en el manejo de plagas, su uso también tiene importantes repercusiones ambientales. Este escenario subraya la necesidad de adoptar estrategias de manejo más sostenibles, que permitan mitigar los impactos negativos asociados al uso de pesticidas y garantizar la protección de los recursos hídricos en el largo plazo.

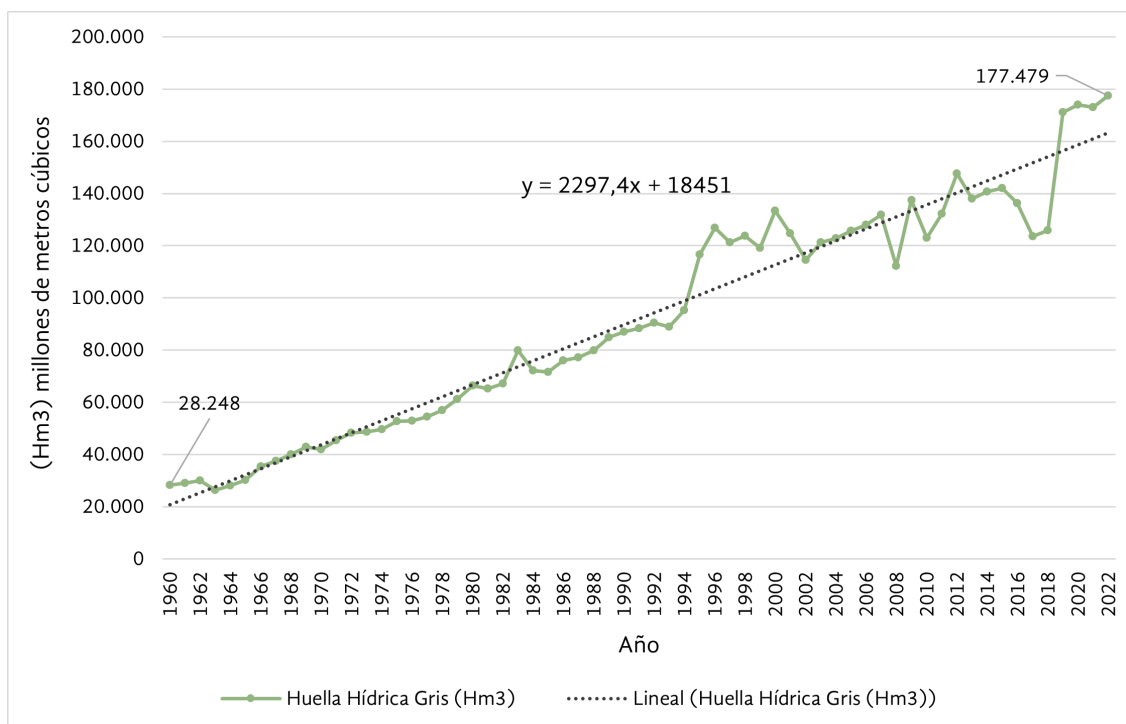


Figura 1. 17 Huella Hídrica Gris del Cultivo de Caña de Azúcar en la CARC Asociada al Uso del herbicida 2,4-D (1960-2022)
Fuente: cálculos propios. Los datos de área sembrada y rendimiento se obtuvieron de la base de datos del proyecto en desarrollo

Huella Hídrica Total (1960-2022)

Para el cálculo de la HH_{total} se consideraron dos escenarios distintos, tomando en cuenta la HH_{gris} asociada tanto al fertilizante nitrogenado como al herbicida 2,4-D. Dado que el herbicida 2,4-D presentó un valor significativamente mayor en comparación con el fertilizante nitrogenado, se definieron dos variantes para la suma de la HH_{total} :

1. HH_{total1} , que incluye la suma de la HH_{gris} generada por el fertilizante nitrogenado.
2. HH_{total2} , que incorpora únicamente la HH_{gris} asociada al herbicida 2,4-D.

Esta distinción facilita un análisis más detallado del impacto relativo de ambos insumos en la HH_{total} . Además, dado que la mayoría de los estudios tienden a considerar únicamente el uso de fertilizantes en el cálculo de la HH_{gris} , esta diferenciación permite un análisis comparativo para el resultado de la HH_{total1} .

En la Figura 1.18 se presentan los resultados de la HH_{total1} asociada a la producción de caña de azúcar en la CARC durante el período 1960-2022, junto con su tendencia lineal. Se observa un incremento sostenido en el volumen de agua utilizado, que comienza con 893 millones de metros cúbicos (Hm³) en 1960 y alcanza 5.867 millones de metros cúbicos en 2022. El análisis por décadas muestra variaciones significativas en las tasas de crecimiento. Durante la primera década (1960-1970), la HH_{total1} creció en 20% (de 893 a 1.104 Hm³). En la década de 1970-1980, el incremento fue de 23,7% (de 1.104 a 1.365 Hm³). Para el período 1980-1990, se registró un crecimiento de 25% (de 1.365 a 1.704 Hm³), seguido de un aumento más moderado del 22% en la década 1990-2000 (de 1.704 a 2.092 Hm³). Finalmente, el período más reciente (2010-2022) experimentó un ascenso del 43% (de 4.007 a 5.867 Hm³).

Por otra parte, de acuerdo con el resultado de la HH_{total2} (ver Figura 1.17), en donde la HH_{gris} corresponde únicamente a la asociada al herbicida 2,4-D, los valores aumentan significativamente en comparación con la HH_{total1} . En este caso, el valor de 182.344 Hm³ de la HH_{total2} en 2022 representa un incremento del 3.006% respecto a la HH_{total1} , que fue de 5.867 Hm³. Este aumento destaca el impacto desproporcionado del uso de 2,4-D en la HH del cultivo y pone de manifiesto la necesidad de profundizar en el estudio de este herbicida, su manejo y sus efectos ambientales en la región. En términos generales, la HH_{total2} del cultivo de caña de azúcar presenta una tendencia creciente a lo largo del período 1960-2022, como se observa en la Figura 1.19. Este incremento comienza con un valor inicial de 28.982 millones de metros cúbicos (Hm³) en 1960 y alcanza los 182.344 millones de metros cúbicos en 2022, reflejando un crecimiento significativo equivalente a 8,5% promedio anual en el uso del recurso hídrico. La tendencia lineal ajustada muestra una pendiente positiva de 2.356,9 Hm³ por año, lo que indica un incremento promedio sostenido a lo largo del tiempo.

En cuanto a la distribución de la HH_{total} en sus tres componentes (verde, azul y gris), la Figura 1.19 presenta los dos escenarios analizados: a) considerando exclusivamente el fertilizante nitrogenado en el cálculo de la HH_{gris} , y b) incluyendo el herbicida 2,4-D en dicho cálculo. En el primer escenario, las proporciones de la HH_{verde} , HH_{azul} y HH_{gris} son del 53%, 29% y 18%, respectivamente, reflejando un equilibrio relativo entre los componentes. Sin embargo, al incluir el uso del herbicida 2,4-D, la HH_{gris} aumenta drásticamente, llegando a representar el 97% del total, mientras que las proporciones de la HH_{verde} y la HH_{azul} disminuyen en forma amplia, quedando en 2% y 1%, respectivamente.

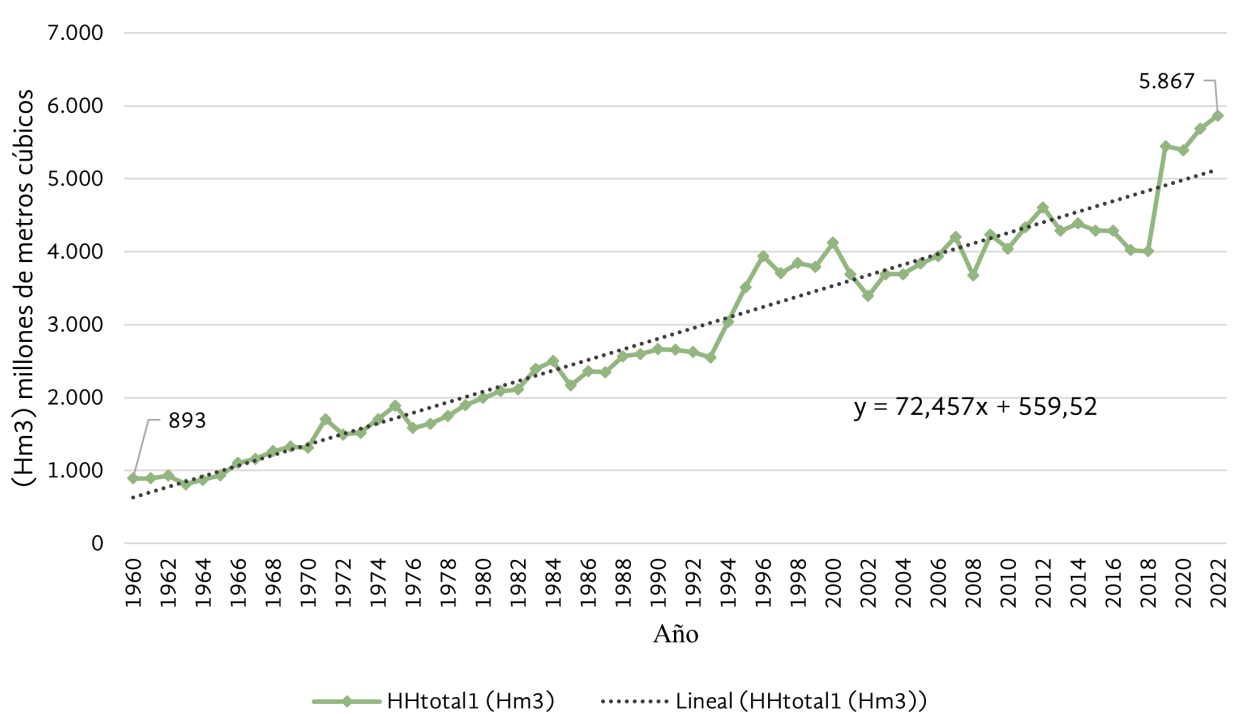


Figura 1. 18 Huella hídrica total (HH_{total1}) del cultivo de la caña de azúcar en la CARC (1960 – 2022) (Hm³)¹²

Fuente: elaboración propia

[28]

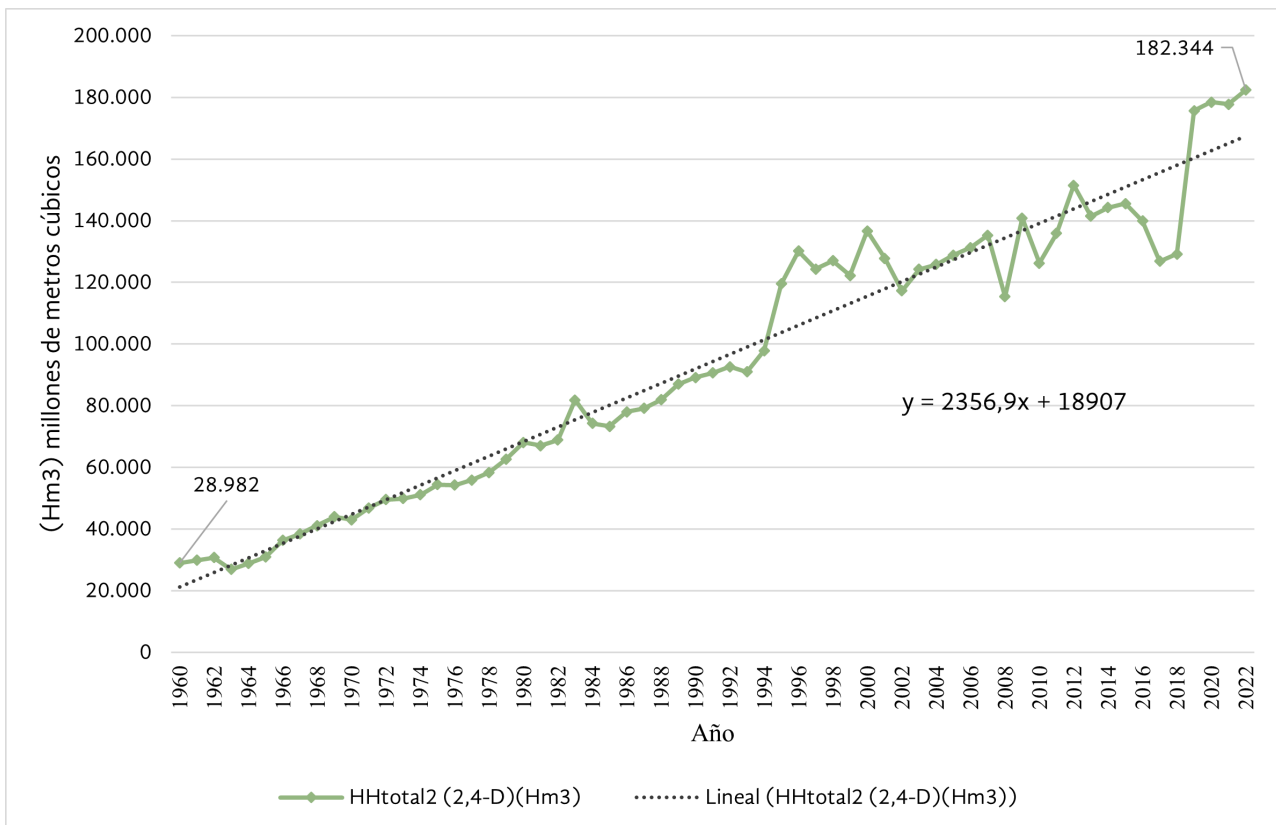


Figura 1.19 Huella hídrica total (HH_{total2}) del cultivo de la caña de azúcar en la CARC (1960 – 2022) (Hm3)

Fuente: elaboración propia

12. Hm3: representa hectómetros cúbicos (Hm3) el cual equivale a 1.000.000 m3

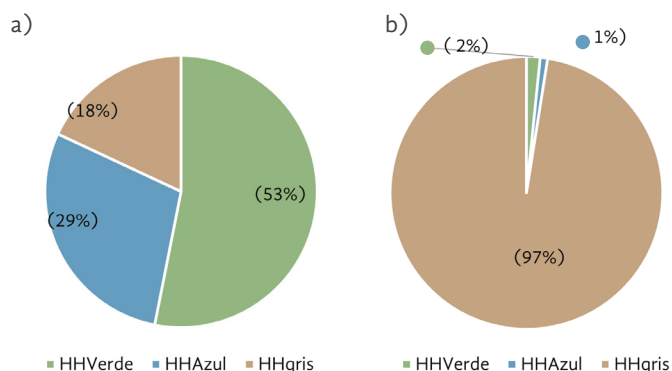


Figura 1.20 Distribución de la HH verde, azul y gris en el cultivo de caña de Azúcar en la Cuenca Alta del Río Cauca (CARC)¹³ (1960-2022)

Fuente: cálculos propios

Nota: El gráfico a) muestra la distribución porcentual de la HHverde, HHAzul y HHgris en el cultivo de caña de azúcar, considerando solo la Urea en el cálculo de la HHgris. El gráfico b) presenta la misma distribución, incluyendo tanto la Urea como el uso de herbicidas en el cálculo de la HHgris.

El resultado de la Figura 1.20a, evidencia que el cultivo de caña de azúcar en la CARC depende en gran medida del agua de lluvia, ya que el 53% de la HH corresponde a la huella verde. La huella azul, que representa el riego superficial y subterráneo, contribuye con un 29%, mientras que la huella gris, que mide el agua necesaria para diluir los contaminantes agroquímicos, representa el 18%. Estos resultados destacan la predominancia del agua de lluvia, la cual ha sido influenciada por eventos climáticos extremos como La Niña. Según datos de Cenicaña, el 2022¹⁴ fue el año más lluvioso en la historia de la RMA, con un promedio de 1661 mm anuales, seguido por 2010 y 2011, años también marcados por episodios fríos en el Pacífico. Lo cual refleja el impacto directo de los fenómenos climáticos en la disponibilidad hídrica para el cultivo.

En contraste, algunos estudios realizados como el de Renderos (2014) sobre el cálculo de la HH en el cultivo de caña de azúcar en El Salvador evidencian una composición dominada por la HH_{verde} (63%), seguida por la HH_{azul} (35%) y una HH_{gris} mínima (2%). Estos valores reflejan una baja dependencia de fertilizantes en el manejo del cultivo. Por su parte, Jorrat et al. (2018), en su estudio realizado en Tucumán, Argentina, reportaron una contribución del 88% correspondiente a la HH_{verde} y del 12% a la HH_{gris} , con una HH_{azul} prácticamente insignificante, lo que se atribuye a las condiciones de escasa dependencia del riego en esta región. De manera similar, Ramírez et al. (2021) analizaron la HH en el Valle del Cauca, Colombia, en un sistema de producción orgánica, encontrando una distribución del 76% para la HH_{verde} y del 24% para la HH_{azul} , mientras que la HH_{gris} no fue considerada.

Estos resultados evidencian que la composición de la HH en el cultivo de caña de azúcar varía considerablemente según las prácticas agrícolas, los insumos empleados y las condiciones climáticas

específicas de cada región. Sin embargo, al analizar la distribución de los componentes de la HH considerando únicamente el uso de fertilizantes, se observa un patrón consistente con otros estudios: la HH_{verde} predomina, seguida por la HH_{azul} , y finalmente la HH_{gris} .

En contraste, de acuerdo con la Figura 1.19, la incorporación del herbicida 2,4 D tiene un efecto notable en la composición de la HH_{total} del cultivo de la caña de azúcar en la CARC, donde la HH_{gris} alcanza un elevado valor de 97% de la HH_{total} . Lo anterior, resalta la importancia de llevar a cabo una evaluación integral que contemple todos los insumos químicos aplicados, incluyendo herbicidas, pesticidas y madurantes. Este enfoque permite capturar con mayor precisión el impacto ambiental asociado al cultivo. Esto no solo aporta claridad sobre la sostenibilidad hídrica del cultivo, sino que también proporciona herramientas clave para mejorar la gestión en la aplicación de agroquímicos y por ende la gestión del recurso hídrico.

1.4.3 Analisis de la Huella Hídrica total del cultivo de caña de azúcar en la CARC (1960 – 2022)

El aumento de la HH_{total} del cultivo de caña de azúcar en la CARC se debe a diferentes factores clave. Entre estos queremos destacar dos: i) el crecimiento del área sembrada del cultivo de la caña de azúcar; y, ii) la dinámica de la producción de caña. Con relación a la primera variable, como se presenta en la Tabla 1.8, el área pasó de 61.600 a 265.138 hectáreas que representó un crecimiento total del 330% o una tasa promedio anual de 5,3%. Termodinámicamente esto no ha sido gratuito. Ambos aspectos han ejercido una presión sustancial sobre los recursos hídricos en la CARC que se reflejan en las diferentes huellas hídricas. La que mide la cantidad de agua usada para riego de los cultivos (superficial o subterránea) pasa de 219 Hm³ en 1960 a 695 Hm³ en 2022, lo que representó un crecimiento total del 217% y un incremento promedio anual del 3,5% en los requerimientos de agua. Este comportamiento pone de manifiesto que la expansión de la superficie agrícola conlleva inevitablemente una mayor demanda del recurso, tanto de fuentes superficiales y subterráneas como de las precipitaciones, reflejando el impacto del crecimiento agrícola en la sostenibilidad hídrica (ver Tabla 1.8).

En cuanto a la HH_{verde} , que representa el uso de agua proveniente de las precipitaciones, ha aumentado un 509% con un crecimiento anual promedio de 11,5%. Esto corrobora que la dependencia del agua de lluvia ha crecido de manera notable, siendo un factor muy importante en la producción y desarrollo del cultivo en la región. Aunque la HH_{azul} , en comparación con la HH_{verde} , es menor, resalta un uso intensivo de fuentes de agua que podrían estar en riesgo de sobreexplotación, especialmente en regiones con disponibilidad limitada.

La HH_{gris} , que mide la cantidad de agua necesaria para diluir contaminantes y mantener la calidad del agua, ha mostrado un crecimiento

13. Los porcentajes presentados fueron obtenidos a partir de la suma total de la Huella Hídrica verde, azul y gris (en hm³) correspondiente a toda la serie de tiempo analizada, que abarca el período de 1960 a 2022.

14. Informe anual Cenicaña (2022)

Var.	Absolutos		Crecimiento Absoluto	Tasa de crecimiento total (%)	Veces que se multiplicó	Tasa prom. anual (%)
	1960	2022				
Ha sembradas (ha)	61.600	265.138	203.538	330	4	5
Prod. de caña (miles de ton)	3.487	29.569	26.082	748	9	12
Rendimiento (ton/ha)	88	119	31	35	1	0
HHverde (precipitaciones) (Hm3)	514	4.169	3.655	711	8	12
HHazul (superficial y subterránea) (Hm3)	219	695	476	217	3	4
HHverde + HHazul (Hm3)	733	4.864	4.131	563	7	9
HHgris N (Hm3)	160	1.002	842	528	6	9
HHgris 2,4-D (Hm3)	28.408	178.842	150.074			
HHtotal1 (Hm3)	893	5.867	4.169			
HHtotal2 (Hm3)	29.141	183.346	154.205			
HHtotal/ha sembrada (Hm3/ha)	0,5	0,7	0,2	46,2	1,5	0,7
HHtotal/producción ((Hm3/ton)	8,4	6,2	-2,2	-25,8	0,7	-0,4

Tabla 1.8 Tasas de crecimiento total y anual de las variables de producción y Huella Hídrica Total de la caña de azúcar en la CARC (1960-2022)

Fuente: cálculos propios. Los datos de área sembrada y rendimiento se obtuvieron de la base de datos del proyecto en desarrollo

significativo en ambas variantes: 528% en total o 8,5% promedio anual. Este incremento es indicativo de un uso intensivo de agroquímicos y fertilizantes, lo cual podría tener impactos negativos en la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos. Esto subraya la necesidad de prácticas más sostenibles que reduzcan la carga contaminante y promuevan un manejo integrado de los recursos hídricos (Tabla 1.8).

Estas dinámicas se reflejan en la HH_{total1} y 2 del cultivo de caña de azúcar en la CARC. La primera (Nitrogeno) pasó de 893 a 5.897 y la segunda de 29.141 Hm³ en 1960 a 183.346 Hm³ en 2022, para un crecimiento promedio anual del 8,5%. Este aumento se debe a diversos factores que afectan la dinámica del uso del agua. En períodos de abundantes lluvias, el uso de agua verde (agua de lluvia) reduce temporalmente la presión sobre las fuentes de agua azul (superficial y subterránea). Sin embargo, en años secos, la dependencia de agua azul aumenta, intensificando la presión sobre los recursos y provocando posibles sobreexplotaciones. Esta variabilidad evidencia la vulnerabilidad del cultivo a las fluctuaciones climáticas y la necesidad de estrategias de manejo hídrico adaptativas. Aunque las tecnologías agrícolas han elevado la producción, a menudo lo han hecho a expensas de un uso más intensivo del recurso, incrementando la HH_{total} .

1.4.4 Huella Hídrica neta y bruta

Teniendo en cuenta que el uso de agua en la agricultura conlleva inevitables pérdidas del recurso, conocidas como pérdidas o ineficiencias del sistema de riego. Estas se generan a lo largo del proceso, desde la captación hasta la aplicación del agua, y pueden atribuirse a varios factores. Se incluyen la evaporación, la infiltración excesiva en el suelo, fugas en tuberías y canales, desbordamientos en sistemas de riego por superficie, mala gestión en la programación del riego, y obstrucciones causadas por sedimentos o malezas, así como un diseño

inadecuado del sistema (Cruz, 2015). En este contexto, aparece la diferencia entre el uso de agua bruta, que se refiere al total de agua utilizada, incluyendo las pérdidas, y el agua neta, que es la cantidad de agua efectivamente absorbida o utilizada directamente por el cultivo, excluyendo las ineficiencias¹⁵.

Según Cruz (2015), en la región, el método de riego por surcos es el más utilizado, abarcando el 79% del área agrícola. Este método presenta pérdidas significativas debido a la percolación, escorrentía y evaporación, lo que dificulta alcanzar una eficiencia total de riego superior al 50%. Lo anterior conllevaría a un incremento en la HH_{azul} , lo que a su vez impactaría en un aumento de la HH_{total} . Esto se puede observar en la Figura 1.21 donde se muestra los resultados de la HH_{azul} , considerando tanto el escenario neto como el bruto. Los datos revelan que el uso bruto de agua azul para la producción de caña de azúcar excedió en 696 Hm³ a la HH_{azul} neta, lo que pone de manifiesto la importancia de continuar implementando tecnologías de riego más eficientes y políticas sostenibles para reducir la brecha entre la huella bruta y la neta, maximizando así el uso del recurso hídrico y mitigando los impactos ambientales.

1.4.5 Análisis comparativo de la HH con otros estudios y reflexiones finales

La Tabla 1.9 permite realizar un análisis comparativo de la HH neta del cultivo de caña de azúcar en la CARC frente a otras regiones del mundo. Los resultados muestran que, en este estudio, la HH_{verde} (141 m³/ton) es superior con todos los valores reportados: en Tucumán, Argentina (89 m³/ton), Argentina en general (95 m³/ton), y Taiwán (119 m³/ton). Con Brasil (140 m³/ton) es bastante similar. Frente a la HH_{azul} es inferior a todas las localidades analizadas: 23,5 m³/ton, en contraste con valores mayores en Tucumán y Taiwan, debido

15. Hasta el momento en los resultados anteriores se han abordado en términos netos, sin tener en cuenta pérdidas por la eficiencia.

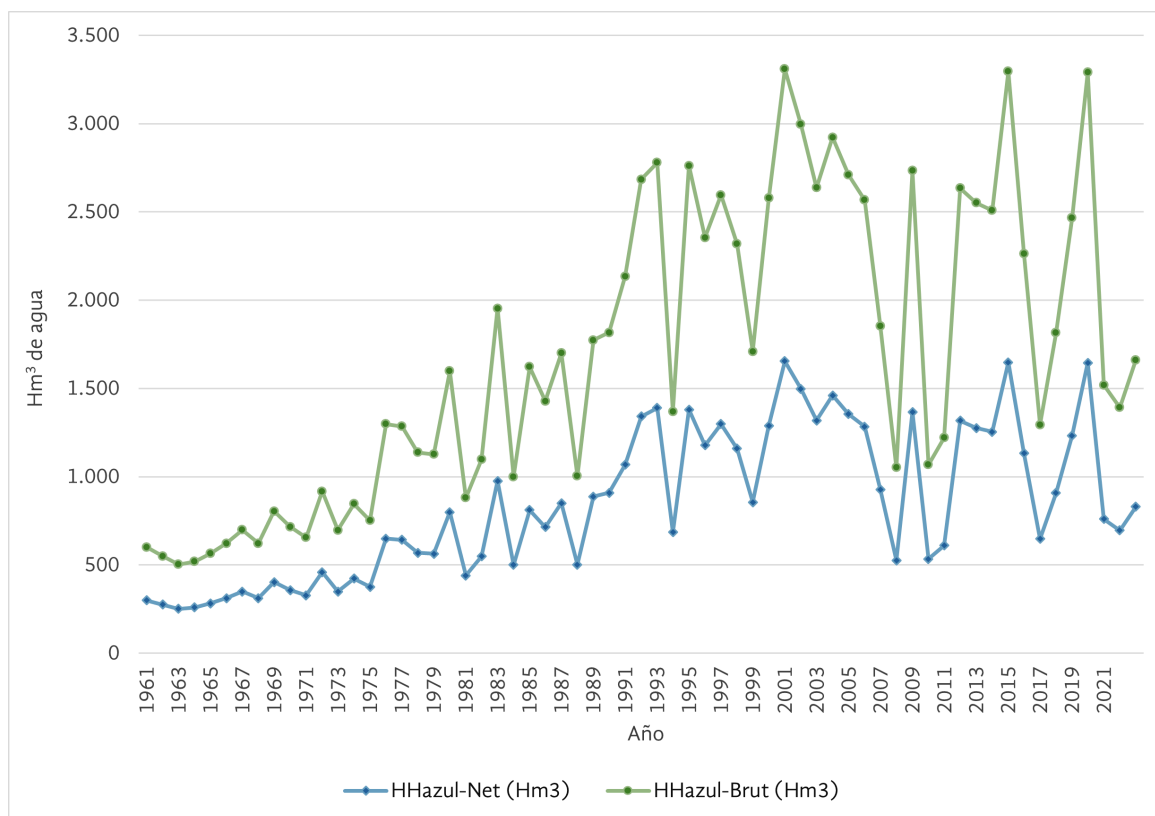


Figura 1.21 Huella Hídrica Azul neta y bruta del cultivo de caña de azúcar en la CARC (1960-2022)¹⁶
Fuente: cálculos propios. Los datos de área sembrada y rendimiento se obtuvieron de la base de datos del proyecto en desarrollo

a su menor dependencia de riego, y es bastante similar a Argentina (25 m³/ha). Sin embargo, el componente diferencial más notable de nuestro estudio es la HH_{gris} , que alcanza un valor de 33,9 m³/ton para Nitrogeno y 6.002 m³/ton para el herbicida 2,4-D. El primero es superior a los otros casos a excepción de Tucumán. El segundo sobresale considerablemente frente a las otras regiones, ya que incluye el aporte de herbicidas en el cálculo, lo que lo posiciona muy por encima del valor reportado por Jorrat, (2018) (703 m³/ton), quien también consideró los agroquímicos en su análisis. En contraste, otros estudios que únicamente consideran la fertilización en la estimación de la HH_{gris} reportan valores inferiores a los de este estudio.

Este análisis comparativo no solo permite dimensionar la posición de la CARC frente a otras regiones del mundo en términos de HH, sino

también evidenciar los retos asociados a la sostenibilidad hídrica de la región. Los resultados destacan cómo la dependencia del agua verde, complementada con un uso significativo de agua azul y una creciente HH_{gris} , ha moldeado una dinámica insostenible de consumo hídrico en la región. En términos generales, es fundamental destacar el papel de la HH_{verde} , que cubre la mayor parte de las necesidades hídricas del cultivo. Este componente refleja una creciente dependencia del cultivo de caña de azúcar a las precipitaciones, lo que ha ido en aumento con el tiempo.

Esta tendencia sugiere una vulnerabilidad frente a la variabilidad climática, ya que cualquier alteración en los regímenes de lluvia podría afectar de manera crítica la sostenibilidad del cultivo y la estabilidad hídrica de la región. Por su parte, la HH_{azul} , aunque presenta tendencias fluctuantes, ha registrado un incremento del 217%, lo que evidencia una

	Este estudio (m³/ton) Nitrogeno (2022)	Este estudio (m³/ ton) 2,4-D-2022	Jorrat et al. (2018)	Gerbens-Leenesand Hoekstra(2012)	Sue et al. (2015)	Scarpate et al. (2016)
Localización	CARC	CARC	Tucumán, Argentina	Argentina	Taiwan	Tiete/Jacare, (Brazil)
Verde	141	141	89	95	119	140
Azul	24	24	0	25	93	0
Gris	34	6.002	703	5	17	22

Tabla 1.9 Análisis Comparativo de la Huella Hídrica neta del Cultivo de Caña de Azúcar en la CARC para el año 2022
Fuente: elaboración propia

16. Teniendo en cuenta una ineficiencia del sistema de riego del 50%

presión cada vez mayor sobre las fuentes hídricas superficiales y subterráneas. Este incremento, es particularmente evidente durante años de menor precipitación, cuando el cultivo de caña intensifica su dependencia del riego para satisfacer sus necesidades hídricas, lo que pone de manifiesto la creciente vulnerabilidad del sistema frente a la limitada disponibilidad del recurso. Esta situación se agrava debido a que el cultivo monopoliza hasta el 87% del agua subterránea y el 64% del agua superficial asignada en la región (HUB, 2023), generando una presión significativa sobre las fuentes hídricas y exacerbando los conflictos por su acceso.

Un aspecto crítico revelado por el estudio es el papel predominante de la HH_{gris} , que creció un 528% durante el período analizado. Este incremento está impulsado principalmente por el uso de agroquímicos como el 2,4-D, cuya contribución a la contaminación hídrica supera incluso la suma de las huellas azul y verde. Este resultado resalta cómo el modelo productivo actual, centrado en la intensificación agrícola, está generando externalidades ambientales significativas, desde la

eutrofización de cuerpos de agua hasta la contaminación de acuíferos y suelos. Este patrón coincide con los hallazgos regionales que identifican al cultivo de caña como uno de los principales responsables de la degradación de la calidad del agua y los ecosistemas hídricos, afectando también la salud de las comunidades locales.

Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de plantear estrategias integrales para la sostenibilidad del cultivo de caña de azúcar en relación con el uso del agua, adoptando un manejo responsable de agroquímicos y mejorando el uso del agua azul con tecnologías más eficientes, como el riego por goteo o aspersión. Además, es fundamental integrar políticas que promuevan la diversificación agrícola en áreas críticas y reduzcan la dependencia de fuentes externas de agua. Este enfoque debe complementarse con esfuerzos para fortalecer la gestión de los recursos hídricos desde un marco de equidad, garantizando que el uso del agua no comprometa las necesidades de otros sectores o comunidades.

[32]

1.5 Referencias

Allan, J. A. (1998). Virtual Water: A Strategic Resource Global Solutions to Regional Deficits. *Groundwater*, 36(4), 545-546. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02825.x>

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. *Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio FAO Riego y Drenaje No 56.

Alvarez-Pugliese, C. E., Machuca-Martínez, F., & Perez-Rincon, M. (2021). Water footprint in gold extraction: A case-study in Suarez, Cauca, Colombia. *Heliyon*, 7(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07949>

Amézquita Bonilla, V. V., & Motta López, D. F. (2015). Evaluación de huella hídrica en la producción de un cultivo de papa R12 ubicado en el municipio El Rosal Cundinamarca. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/315

Arévalo, D. (2012). Una mirada a la agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica. <https://www.wwf.org.co/?249918/Una-mirada-a-la-agricultura-de-Colombia-desde-su-Huella-Hidrica>

Cenicaña. (2015, 17 de marzo). Determinación del nitrógeno (N) disponible en el suelo. Centro de Investigación de la Caña de

Azúcar de Colombia. Recuperado de <https://www.cenicana.org/determinacion-del-nitrogeno-n-disponible-en-el-suelo/>

Chapagain, A. K. (2017). Water Footprint: State of the Art: What, Why, and How? En *Encyclopedia of Sustainable Technologies* (pp. 153-163). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10164-2>

Chukalla, A. D., Krol, M. S., & Hoekstra, A. Y. (2018). Grey water footprint reduction in irrigated crop production: Effect of nitrogen application rate, nitrogen form, tillage practice and irrigation strategy. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(6), 3245-3259. <https://doi.org/10.5194/hess-22-3245-2018>

Conselho Nacional do Meio Ambiente- Conama. (2011). Resolução N 430, De 13 De Maio De 2011. CPRH- Agência.

Cruz, J. R. (2015). Manejo Eficiente del Riego en el Cultivo de Caña de azúcar en el Valle Geográfico del Río Cauca (Vol. 1). Cenicaña.

Donley, N. (2019). The USA lags behind other agricultural nations in banning harmful pesticides. *Environmental Health*, 18(1), 44. <https://doi.org/10.1186/s12940-019-0488-0>

Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome, FAO.

Doorenbos, J., Kassam, A., Bentvelsen, C., Branscheid, J., Plusje, J., Smith, M., Uittenbogaard, G., & van der Wal, H. (1979). Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. *Estudio FAO Riego y Drenaje* 33. Roma: FAO.

Ercin, E., & Hoekstra, A. (2012). *Carbon and water footprints: Concepts, methodologies and policy responses*. (World Water Assessment Programme; No. 4). UNESCO.

FAO. (2013). Land and Water. Recuperado en: http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html

Franke, N. A., Boyacioglu, H., & Hoekstra, A. Y. (2013). *Grey water footprint accounting: Tier 1 supporting guidelines*.

Gómez, J.F. Control de malezas. En: CENICAÑA. *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia*, Cali, CENICAÑA, 1995. p.143-152.

Gleick, P. H. (2000). A Look at Twenty-first Century Water Resources Development. *Water International*, 25(1), 127-138. <https://doi.org/10.1080/02508060008686804>

Hoekstra, A. Y. (2003). Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade Value of Water Edited by. IHE Delft.

Hoekstra, A., & Chapagain, A. (2008). *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources*. Oxford, UK, Blackwell Publishing.

Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2007). Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. En *Integrated Assessment of Water Resources and Global Change* (pp. 35-48). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5591-1_3

Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2009). *Water footprint manual: State of the art 2009*. Water Footprint Network, Enschede, the Netherlands.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard* (1.a ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849775526>.

HUB Collaborative (2023 - A publicar). Documento de Caracterización de la Cuenca Alta del Río Cauca (CARC), Colombia. Santiago de Cali: Universidad del Valle e Instituto Cinara.IDEAM. (2013). Evaluación multisectorial de la huella hídrica en Colombia.

IDEAM. (2015). Estudio Nacional del Agua ENA 2014. Bogotá. Obtenido de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf

IDEAM. (2022). Estudio Nacional del Agua ENA 2022. Bogotá. Obtenido de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2022.pdf

Jamshidi, S., Imani, S., & Delavar, M. (2022). An approach to quantifying the grey water footprint of agricultural productions in basins with impaired environment. *Journal of Hydrology*, 606. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127458>

Jusmet, J. R. (2010). Las presiones ambientales: Población, abundancia y tecnologías. *Revista de Economía Crítica*, (9), 236-239.

Kongboon, R., & Sampattagul, S. (2012). The water footprint of sugarcane and cassava in northern Thailand. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 40, 451-460. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.215>

Leal-Echeverri, J. C., & Tobón, C. (2021). The water footprint of coffee production in Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 74(3), 9685-9697. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n3.91461>

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577-1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>

Mekonnen, M., & Hoekstra, A. Y. (2011). National water footprint accounts: *The green, blue and grey water footprint of production and consumption*. Unesco-IHE Institute for Water Education. Value of Water Research Report Series No. 50.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO. (2000). *New Dimensions in Water Security*. Report AGL/ MISC/25/2000. Rome. <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/misc25.pdf>

Organización Mundial de la Salud. (2006). Guías para la calidad del agua potable. Volumen 1. 3ra edición. La Organización. Ginebra, Suiza. 185 p.

Ovalle Barros, M. J. (2012). Estimación de la Huella Hídrica de cultivos con potencial bioenergético en la provincia de Limarí, región de Coquimbo, Chile [Memoria para optar al título profesional de Ingeniera en Recursos Naturales Renovables]. Universidad de Chile.

Pérez-Rincón, M. (2007). Comercio Internacional y Medio Ambiente en Colombia: Mirada desde la Economía Ecológica, Programa Editorial Universidad del Valle.

Pérez-Rincón, M. A., Peña, M. R., & Álvarez, P. (2011). Agroindustria cañera y uso del agua: análisis crítico en el contexto de la política de agrocombustibles en Colombia. *Ambiente y Sociedad*, XIV(2), 153-178.

Quintero Durán, R. (1993). Interpretación del Análisis de Suelo y Recomendaciones de Fertilizantes para la Caña de Azúcar. En CENICAÑA.

Quintero Durán, R. (1997). Fertilización Nitrogenada en Caña de Azúcar.

Quintero Durán, R. (1999). Extracción de Nutrientes por la Caña de Azúcar. Carta Trimestral, 2.

Ramírez, L. F., Becerra, D., & Mora, C. H. (s. f.). Huella hídrica verde y azul de la producción de caña de azúcar orgánica en la zona centro del Valle del Cauca. *Ingeniería y Competitividad: Revista Científica y Tecnológicas*. <https://doi.org/10.25100/iyv.v24i2.11264>

- Renderos, R. (2014).** Huella Hídrica del Cultivo de Caña de Azúcar. <https://www.researchgate.net/publication/303939723>
- Restrepo, S., & Bedoya, D. (2015).** El uso del agua en el cultivo de caña de azúcar: Una mirada desde la huella hídrica. Santiago de Cali: Universidad del Valle. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/13091/CB0519672.pdf?sequence=1>
- Ridoutt, B. G., & Pfister, S. (2013).** A new water footprint calculation method integrating consumptive and degradative water use into a single stand-alone weighted indicator. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(2), 204–207. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0458-z>
- Rosegrant, M., & Ringler, C. (2000).** Impact on food security and rural development of transferring water out of agriculture. *Water Policy*, 1(6), 567–586. [https://doi.org/10.1016/S1366-7017\(99\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S1366-7017(99)00018-5)
- Scarpate, F. V., Hernandes, T. A. D., Ruiz-Corrêa, S. T., Kolln, O. T., Gava, G. J. D. C., Dos Santos, L. N. S., & Victoria, R. L. (2016).** Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4576–4584. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.107>
- Sun, Y., Wang, Z., Lee, L. C., Li, X., & Wang, Y. (2022).** A bibliometrics review of hotspots in water footprint research based on co-words network analysis. *En Frontiers in Environmental Science* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1027936>
- Vale, R. L., Netto, A. M., Toríbio de Lima Xavier, B., de Lâvor Paes Barreto, M., & Siqueira da Silva, J. P. (2019).** Assessment of the gray water footprint of the pesticide mixture in a soil cultivated with sugarcane in the northern area of the State of Pernambuco, Brazil. *En Journal of Cleaner Production* (Vol. 234, pp. 925–932). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.282>
- Wackernagel, M., & Rees, W. E. (1996).** *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. New Society Publishers.
- Weisz, H. (2001).** *Material flow analysis and environmental indicators*. Federal Ministry of Agriculture and Forestry, Environment and Water Management, April, Vienna, Austria.
- Wu, M., Cao, X., Ren, J., Shu, R., & Zeng, W. (2021).** Formation mechanism and step effect analysis of the crop gray water footprint in rice production. *Science of the Total Environment*, 752. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141897>
- Yu, N., Wang, B., Ren, B., Zhao, B., Liu, P., & Zhang, J. (2024).** Water and nitrogen footprint assessment of integrated agronomic practice management in a summer maize cropping system. *Journal of Integrative Agriculture*, 23(10), 3610–3621. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.03.061>



La Huella de Carbono del cultivo de caña de azúcar en la CARC, Capítulo 2: Colombia (1960-2022)

En la presente sección se realiza el cálculo de la Huella de Carbono (HC) para el monocultivo de caña de azúcar en la CARC. En primer lugar, se define el concepto de manera general y después se realiza una pequeña revisión de documentos que han realizado este cálculo a nivel local para Colombia. A partir de esta revisión, se selecciona una de las metodologías para estimar la HC de la caña de azúcar en la CARC; el cálculo de este indicador de presión se expresa en términos de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (en $\text{ton CO}_2\text{eq}$) hacia la atmósfera. Finalmente, se presentan los resultados de la estimación y las conclusiones de estos hallazgos.

2.1 Contexto y antecedentes

Una de las principales preocupaciones de la agenda global actual, es regular a mediano y largo plazo la temperatura del planeta en pos de «frenar» el Cambio Climático (CC) o dicho de otra manera, de «enfriar el planeta». Este fenómeno es producido en su gran mayoría por las actividades antropogénicas que, desde la Revolución Industrial, han robustecido el patrón económico y la dependencia hacia los combustibles fósiles, y ha generado aumentos en la temperatura del planeta que amenazan, según la comunidad científica, la continuidad de la vida en la Tierra.

En el imaginario popular, la emisión de GEI (véase Recuadro 1) es generada únicamente por la quema de combustibles fósiles. Sin embargo, aunque esta sí es la razón principal de emisiones, no es la única: el CC también es originado por otras actividades como el cambio del uso del suelo, la ganadería o las actividades industriales, entre otras.

En diciembre de 1997, la Organización de Naciones Unidas aprobó el Protocolo de Kyoto, que busca comprometer a los países industrializados a «limitar y reducir las emisiones de GEI de conformidad con las

Los GEI son aquellos compuestos presentes en la atmósfera terrestre que contribuyen al aumento de la temperatura del planeta. Estos gases son emitidos de forma natural como antropógena, es decir, producto de las actividades humanas «industriales, de transporte, de producción agropecuaria, de deforestación, de disposición de residuos sólidos y líquidos, de conversión de páramos y humedales a tierras de cultivos o por actividades de minería, entre otras» (IDEAM, s.f.).

En sí misma, la emisión de GEI no es algo negativo, pues el Efecto Invernadero natural es un fenómeno que permite que la temperatura en la Tierra se mantenga cálida para que pueda albergar vida. El problema es que, con el aumento en la producción y el consumo energético fósil desde finales del siglo XVIII se han incrementado «las concentraciones de los GEI en la atmósfera» (Olivo & Soto, 2010). Esto ha provocado sobrecalentamientos de la Tierra, y con ello extinción de especies y ecosistemas. Por esto, mantener y controlar los niveles de emisión de GEI es un deber en la lucha contra el CC.

Recuadro 1. ¿Qué son los Gases de Efecto Invernadero (GEI)?

Fuente: adaptado de Pérez-Rincón et al (2024)

metas individuales acordada»¹⁷ (ONU, 1998). Según este protocolo, en la atmósfera terrestre están presentes, principalmente, seis gases: i) el dióxido de carbono (CO_2); ii) el metano (CH_4); iii) el óxido nitrroso (N_2O); iv) los hidrofluorocarbonos (HFC); v) los perfluorocarbonos

17. https://unfccc.int/es/kyoto_protocol

(PFC) y vi) el hexafluoruro de azufre (SF_6). Cada uno de estos gases tiene su tiempo de duración en la atmósfera (véase Tabla 2.1), y es el CO_2 el contaminante con mayor presencia.

Así como la permanencia de estos gases en la atmósfera tiene diferente duración, su contribución al Calentamiento Global también se da en proporciones diferentes. El Potencial de Calentamiento Global (PCG) es un indicador utilizado para medir la emisión de GEI. Así, entre mayor sea el PCG «mayor será el grado de calentamiento que un gas produce sobre la Tierra, en comparación con el dióxido de carbono» (PNUMA, 2016). Este indicador toma como referencia al CO_2 dado que, según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) su PCG en un lapso temporal de 100 años es 1 (véase Tabla 2.2).

Estas unidades permiten comparar y sumar diferentes gases en los mismos términos. El CO_2 equivalente se calcula multiplicando la masa de cada gas emitido por su factor de equivalencia respecto al CO_2 . Por ejemplo, el metano (CH_4) tiene un potencial de calentamiento global 21 veces mayor que el del CO_2 . Por lo tanto, 1 tonelada de metano se considera equivalente a 21 toneladas de CO_2 en términos de su impacto sobre el calentamiento global.

Adicional a lo anterior, el Protocolo de Kyoto (1998) y el IPCC (2006) definen los sectores y las categorías que son fuentes de emisión de GEI. Esto, porque además de ilustrar las metodologías de cálculo, es importante también comprender cuáles son las fuentes que originan estas emisiones, es decir, qué procesos socioeconómicos las generan. El IPCC, en sus directrices para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC, 2006)¹⁹, define cuatro fuentes de emisión de GEI, explicadas en la siguiente Tabla 2.3:

Tipo de Gas	Tiempo de estancia en la atmósfera
Gas carbónico: (CO_2)	Entre 100 - 150 años ¹⁸
Metano: (CH_4)	12 años
Óxido nitroso: (N_2O)	114 años
Hidrofluorocarbonos: (HFC)	Entre 1 y 270 años
Perfluorocarbonos: (PFC)	Entre 1.000 - 50.000 años
Hexafluoruro de azufre: (SF_6)	3.200 años

Tabla 2.1 Tiempo de duración de GEI en la atmósfera terrestre

Fuente: elaboración propia con base en IPCC (2007)

Tipo de Gas	Potencial de Calentamiento Global (100 años)
Gas carbónico: (CO_2)	1
Metano: (CH_4)	21
Óxido nitroso: (N_2O)	310
Hidrofluorocarbonos: (HFC)	140 a 11.700
Perfluorocarbonos: (PFC)	6.500 a 9.200
Hexafluoruro de azufre: (SF_6)	23,9

Tabla 2.2 Potenciales de Calentamiento Global (PCG)

Fuente: elaboración propia con base en IPCC (2007)

Sector	Sigla	Definición
Energía	-	Integrado por actividades relacionadas con quema de combustibles. Lo componen las industrias energéticas (generación de electricidad, refinación de petróleo, etc.), las industrias manufactureras y de construcción (maquinaria, minería, procesamiento de alimentos, etc.), el transporte (aviación, transporte terrestre, ferrocarriles, navegación marítima y fluvial), entre otros.
Procesos industriales y uso de productos	IPPU	Contiene a la industria de los minerales (producción de cemento, vidrio, etc.), las actividades de la industria química (producción de compuestos como el amoníaco, el ácido nítrico o la producción petroquímica), de la industria de los metales (hierro, acero, aluminio, plomo, etc.), el uso de productos no energéticos de combustibles y solventes (lubricantes o la cera de parafina), la industria electrónica (producción de pantallas planas TFT o células fotovoltaicas), los sustitutos de sustancias que agotan la capa de ozono (aerosoles, solventes, espumas, etc.), la manufactura y utilización de otros productos (uso de diversos compuestos en el área militar y médica), entre otros.

Tabla 2.3 Principales sectores fuentes de emisión de GEI según el IPCC, parte 1

Fuente: elaboración propia con base en las directrices para los inventarios nacionales de Gases de Efecto Invernadero (IPCC, 2006)

18. Sin embargo, según el IPCC (2007), el CO_2 «no tiene un período específico de vida porque está en ciclo continuo con la atmósfera (...) y su eliminación neta (...) involucra una gama de procesos con escalas de tiempo diferentes».

19. Véase <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>

Sector	Sigla	Definición
Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra	AFO-LU	Sector muy importante, pues las emisiones de GEI entre los ecosistemas y la atmósfera son controladas por la absorción que realizan las plantas por medio de la fotosíntesis (IPCC, 2006). AFOLU contiene los usos del suelo y sus cambios asociados a la expansión de los sectores económicos que requieren tierra, como actividades forestales (incluyendo la deforestación), los cultivos, pastizales, humedales, asentamientos humanos y otras. También incluye la ganadería (la gestión del estiércol y la fermentación entérica ²⁰ de ganado vacuno, ovino, porcino, de aves de corral, entre otros); las fuentes de emisión de CO ₂ de la tierra para la agricultura (como la preparación del suelo para cultivo, los cultivos de arroz, etc.). En este rubro, el cambio de uso del suelo de actividades o funciones captadoras de carbono por actividades generadoras de carbono es un factor central explicativo del CC.
Desechos	-	El sector de la gestión de residuos incluye los procesos de eliminación de desechos sólidos, su tratamiento biológico, además de su incineración abierta. Además, incluye el tratamiento y eliminación de las aguas residuales tanto domésticas como industriales.

Tabla 2.3 Principales sectores fuentes de emisión de GEI según el IPCC, parte 2

Fuente: elaboración propia con base en las directrices para los inventarios nacionales de Gases de Efecto Invernadero (IPCC, 2006)

Esta división sectorial permite ilustrar que las emisiones de GEI son originadas por fuentes variadas, en donde la actividad humana es central en su explicación. En síntesis, la quema de combustibles fósiles puede ser un factor determinante en la generación de GEI global tanto como la deforestación, las actividades industriales o las asociadas al transporte.

2.2 ¿Qué es la Huella de Carbono?

Para comprender el concepto de Huella de Carbono (HC) resulta pertinente, de manera previa, traer a consideración algunas definiciones incluidas en el Glosario de términos del IPCC (2022):

- **Dióxido de carbono (CO₂):** El CO₂, además de ser un gas natural, es también un subproducto de la quema de combustibles fósiles y de biomasa, de los cambios de uso de la tierra (AFOLU) y de los procesos industriales (IPPU). Es el principal GEI antropogénico que afecta el equilibrio radiativo de la Tierra. Es el gas de referencia con el que se miden otros GEI y, por tanto, tiene un potencial de calentamiento global (PCG) de 1.

- **Emisiones antropogénicas:** Las componen los aerosoles, precursores y emisiones de GEI provocadas por las actividades humanas. Estas actividades incluyen la quema de combustibles fósiles, la deforestación, el sector AFOLU e IPPU, la fertilización y la gestión de residuos.

- **Emisiones de combustibles fósiles:** Emisiones de GEI (...) resultantes de la combustión de combustibles procedentes de depósitos de carbono fósiles, como el petróleo, el gas y el carbón.

De esta manera, el IPCC adopta la definición de Huella de Carbono (HC) de Wiedmann and Minx (2008) y la entiende como la medida de la cantidad total exclusiva de emisiones de CO₂ causadas directa e indirectamente por una actividad o acumuladas a lo largo de las etapas

de vida de un producto (Wiedmann y Minx, 2008). Entonces, según esta definición, la HC hace referencia al cálculo de la densidad de CO₂ medido en toneladas o kilogramos, emitida por diferentes actividades humanas.

Sin embargo, autores como Espíndola y Valderrama (2012) destacan que no existe una definición universalmente aceptada ya que, a pesar de que el concepto ha evolucionado y ganado popularidad desde los años 70 con marcos metodológicos desarrollados por Daly (1968) o Leontief (1970), todavía persiste una falta de consenso sobre su cálculo y las variables a considerar. Esto ha llevado a la creación de diversas y diferentes metodologías para estimarla. Así, la noción de huella implica necesariamente el cálculo de las emisiones provocadas indirectamente en todo el ciclo de producción: “*algunos autores sostienen que una “huella”, por el significado del concepto, debe abarcar todos los efectos que deja tras de sí una actividad. En el caso de una HC, debe incluir todas las emisiones de gases de efecto invernadero que se pueden asociar directa e indirectamente con una actividad, y por lo tanto el análisis debe abarcar todo el ciclo de vida de un producto o servicio, desde las materias primas e insumos hasta el producto o servicio final*” (Espíndola & Valderrama, 2012. P. 167).

A partir de estas definiciones, se identifican cuatro principales metodologías para el cálculo de la HC, relacionadas en la Tabla 2.4.

Las **Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de Gases de Efecto Invernadero** proporcionan un marco estandarizado para cuantificar las emisiones y absorciones de GEI a nivel nacional. Esta metodología utiliza un enfoque basado en categorías de fuentes y sumideros y abarca los sectores explicados en la Tabla 2.3. Se fundamenta en la aplicación de factores de emisión específicos, y permite hacer cálculos en tres niveles de complejidad (niveles 1, 2 y 3) que se adaptan a la disponibilidad de datos y capacidades técnicas de cada país.

20. La “fermentación entérica” es el proceso digestivo de convertir los azúcares en moléculas simples para su absorción en el torrente sanguíneo. Esta actividad produce metano como subproducto.

Nombre del método	Referencia/País	Unidad de medición	Escala	Actividades
Directrices del IPCC de 2006/2019 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero²¹	Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2006; 2019)	Gg CO ₂ eq/año (miles de toneladas)	Nacional.	Agricultura, energía, residuos, cambio de uso del suelo (AFOLU), procesos industriales (IPPU)
Protocolo de Gases Efecto Invernadero (GHG Protocol)	Protocolo GEI (2001) / Multinacional	Ton CO ₂ eq/año	Empresa	Todas las actividades de una organización
Balance de Carbono (Bilan Carbone)	BC (2002) / Francia	Ton CO ₂ eq/año / kg CO ₂ eq/Unidad funcional	Empresa, Territorio, Producto	Todas las actividades de una empresa
Especificaciones Públicamente Disponibles (PAS 2050)	Grupo BSI (2008) / UK	kg CO ₂ eq/Unidad funcional	Producto	Todas las actividades esencialmente productivas
Método Compuesto de las Cuentas Contables (MC3)	Doménech (2004)/ España	Ton CO ₂ eq/año / Ton CO ₂ eq/ton producto / Hectáreas globales (Gha)	Empresa, Producto	Todas las actividades de una organización

Tabla 2.4 Principales métodos utilizados en el cálculo de la Huella de Carbono
Fuente: adaptado de Espíndola y Valderrama (2012)

[38]

El Protocolo de Gases Efecto Invernadero, implementado en 2001 por el Consejo Mundial de Negocios para el Desarrollo Sustentable y el Instituto de Recursos Mundiales, se ha consolidado como la principal referencia de contabilización de emisiones a escala mundial. Este protocolo establece un marco general para el cálculo de emisiones y es de acceso gratuito. Su enfoque está dirigido principalmente a la contabilización de las emisiones de empresas, proporcionando herramientas que facilitan el cálculo de emisiones operacionales. Por su parte, el Balance de Carbono fue implementado en 2002 por la Agencia del Medio Ambiente y Energía de Francia (ADEME), y es un método que convierte datos de actividades productivas en emisiones al utilizar factores de emisión. Este método clasifica las emisiones según su fuente y abarca tanto empresas como territorios y productos. Su flexibilidad lo hace una herramienta metodológica muy práctica, además de que su base es una planilla de Excel. Este método cumple estándares internacionales como la ISO 14.064²² y el protocolo GEI.

De manera similar, las **Especificaciones Públicamente Disponibles** (PAS 2050), desarrolladas en 2008 por el Instituto Británico de Estandarización, están centradas en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de productos y servicios. Este enfoque permite evaluar las emisiones desde una perspectiva de ciclo completo, considerando todas las fuentes de emisión posibles a lo largo de las etapas del producto. El método también se apoya en los estándares ISO y se utiliza especialmente para analizar el impacto ambiental de bienes y servicios en el contexto empresarial. Finalmente, el Método Compuesto de las Cuentas Contables (MC3),

desarrollado en España en 2004, ofrece un enfoque organizacional para el cálculo de la HC, delimitando de manera clara el alcance de las actividades de una entidad sin necesidad de involucrar a clientes o proveedores. Esto permite una integración automatizada a lo largo de la cadena de suministro y facilita la incorporación de datos contables en el cálculo. Este método también permite expresar la HC en términos de hectáreas globales, conectando la HC con la Huella Ecológica (HE).

El cálculo de la HC puede incluir diferentes tipos de emisiones, categorizadas en emisiones directas (ocurren en las instalaciones de la entidad) e indirectas (proviene de la cadena de suministro, como el transporte de materiales). Puede tener diferentes escalas y calcularse a nivel de un país, de un territorio, de una empresa o de una persona. Finalmente, las emisiones pueden provenir de fuentes móviles (transporte) o de fuentes fijas (cultivos). En cualquier caso, es importante mencionar que independiente de la metodología escogida, todas siguen una misma estructura de cálculo: el total de la actividad industrial medida en términos físicos es multiplicada por un factor de emisión específico para dicha actividad.

Así, la metodología general para calcular la HC involucra varias etapas que incluyen: i) la identificación de fuentes de emisión; ii) la recolección de los datos y iii) la aplicación de los factores de emisión. En este caso específico, se contabilizan las emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq)²³ asociadas a una actividad o proceso específico. La fórmula general de cálculo de HC se define en la Ecuación 2.1.

21. Las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (Directrices de 2006) constituyen el resultado de la invitación efectuada por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)

22. Diseño, desarrollo y gestión de inventarios de GEI para organizaciones. Puede verse en: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14064:-1:ed-2:v1:es>

23. En el cálculo de la Huella de Carbono, se utiliza la unidad de medida "de dióxido de carbono equivalente" (CO₂e) para expresar las emisiones de todos los gases de efecto invernadero en una única métrica. Esta unidad métrica está definida por el Potencial de Calentamiento Global, explicado en la Tabla 2.2 Potenciales de Calentamiento Global (PCG) de este capítulo.

Ecuación 2.1. Ecuación general para el cálculo de la Huella de Carbono

$$HC = \sum (E_i \times F_i)$$

Donde,

- E_i es la cantidad de actividad o consumo de un recurso (e.g. litros de combustible).
- F_i es el factor de emisión asociado a la actividad i , expresado en unidades de CO_2eq por unidad de actividad (e.g. $\text{Kg CO}_2\text{eq}$ por litro de combustible).

Los factores de emisión utilizados en el cálculo son generalmente obtenidos de fuentes estandarizadas como el IPCC o el Protocolo de Gases Efecto Invernadero (GHG Protocol).

En Colombia, la estimación de la HC se ajusta a las metodologías internacionales. En el documento de revisión de factores de emisión realizada por Rodríguez et. al (2020), se identifican los elementos específicos que son utilizados para adecuarse a las condiciones locales. Por ejemplo, a nivel nacional se han desarrollado diferentes herramientas como la *Calculadora 2050*, desarrollada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) que adapta la metodología PAS2050 para proyectar escenarios de reducción de emisiones en diferentes sectores económicos (Rodríguez et al., 2020).

Esta herramienta utiliza la misma fórmula general observada en la Ecuación , pero con factores de emisión específicos para el contexto colombiano adaptados mediante la *Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono* (ECDBC). O la herramienta de la Secretaría de Ambiente de Bogotá²⁴ que utiliza el GHG Protocol, ajustando los factores de emisión para incluir emisiones biogénicas de CH_4 y CO_2 (Rodríguez et al., 2020). Aunque las adaptaciones locales permiten aplicar metodologías internacionales a las particularidades colombianas, en el proceso pueden generarse posibles discrepancias con el IPCC. Sin embargo, las adaptaciones metodológicas a contextos específicos pueden otorgar resultados, de hecho, más precisos.

En conclusión, la HC se muestra como un indicador clave para medir el impacto de las actividades humanas en términos de emisiones de GEI a la atmósfera. A pesar de que su cálculo sigue una estructura general basada en la actividad productiva y los factores de emisión, éstos últimos varían según el contexto analizado, y los objetivos y el alcance propuestos. Finalmente, aunque no existe una definición universalmente aceptada de este concepto, los distintos enfoques metodológicos permiten una evaluación de las emisiones en aras de adoptar medidas que contribuyan en la reducción del CC.

2.3 La Huella de Carbono en el cultivo caña de azúcar

A nivel mundial, aproximadamente el 50% de la superficie terrestre ha sido transformada por la acción directa del ser humano. El 20%

de los ecosistemas terrestres se ha convertido en tierras de cultivo permanentes, y el 25% de los bosques han sido deforestados para diversos usos, como la agricultura y las pasturas (Moore, 2002). La expansión de tierras agrícolas ha aumentado en algunas regiones para satisfacer la creciente demanda de alimentos y fibras, aumentando a su vez las emisiones de carbono (IPCC, 2006). Sin embargo, la cantidad de carbono almacenado o emitido en tierras de cultivo depende del tipo de cultivo, las prácticas de manejo y las condiciones del suelo y el clima. Los cultivos anuales, como los cereales y legumbres, no retienen carbono a largo plazo debido a su ciclo de cosecha anual. Los cambios en las reservas de carbono del suelo están estrechamente vinculados a las prácticas agrícolas, como la rotación de cultivos, la labranza y el manejo de residuos. Además, la quema de residuos agrícolas genera emisiones significativas de GEI distintos al CO_2 (IPCC, 2009).

Colombia, gracias a su posición geográfica y fisiografía, posee una amplia diversidad climática, abundantes recursos agrícolas y de agua dulce, así como una biodiversidad y riqueza natural. Su agricultura se distingue por monocultivos tecnificados según la región, como caña de azúcar, café, flores, algodón, plátano, banano, sorgo, maíz, arroz, palma africana, papa y yuca, entre otros (Hodson et al., 2017). El sector azucarero colombiano, con una producción de caña de azúcar de 29,6 millones de toneladas en 2022, se posiciona como un actor clave en el mercado global de azúcar. Según la Organización Internacional del Azúcar (OIA), Colombia ocupó el décimo cuarto lugar entre los principales productores de azúcar a nivel mundial, contribuyendo con el 2,5 % del PIB agrícola nacional. La producción de caña de azúcar en el país se concentra en el valle geográfico del río Cauca, donde se registraron 265.138 hectáreas sembradas en 2022 (Volumen No. 2).

A su vez, la producción de azúcar genera impactos ambientales significativos, entre los cuales destacan las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El ciclo de vida de la producción de caña de azúcar, ilustrado en la Figura 2.1, comprende cuatro etapas principales: cultivo, procesamiento, transporte y producción. Cada una de estas etapas contribuye de manera diferente a las emisiones totales de GEI. Según el IPCC (2009), el sector AFOLU fue responsable de aproximadamente el 23% de las emisiones antropogénicas globales durante el período 2007-2016. En particular, la agricultura se identifica como una de las principales fuentes de GEI, debido a la liberación significativa de gases como el óxido nitroso (N_2O) y el metano (CH_4), ambos con un alto potencial de calentamiento global.

De manera específica, la agricultura aporta aproximadamente el 13% de las emisiones globales de CO_2 , el 44% de CH_4 y el 81% de N_2O , siendo este último principalmente atribuible a la aplicación de fertilizantes nitrogenados (IPCC, 2019). Este problema se agrava debido a la desincronización entre la demanda de nitrógeno por parte de los cultivos y el suministro disponible en el suelo, lo que genera

[39]

24. Véase <https://www.ambientebogota.gov.co/documents/10184/818975/Boletin+15%C2%B0+-+Huella+de+Carbono.pdf>

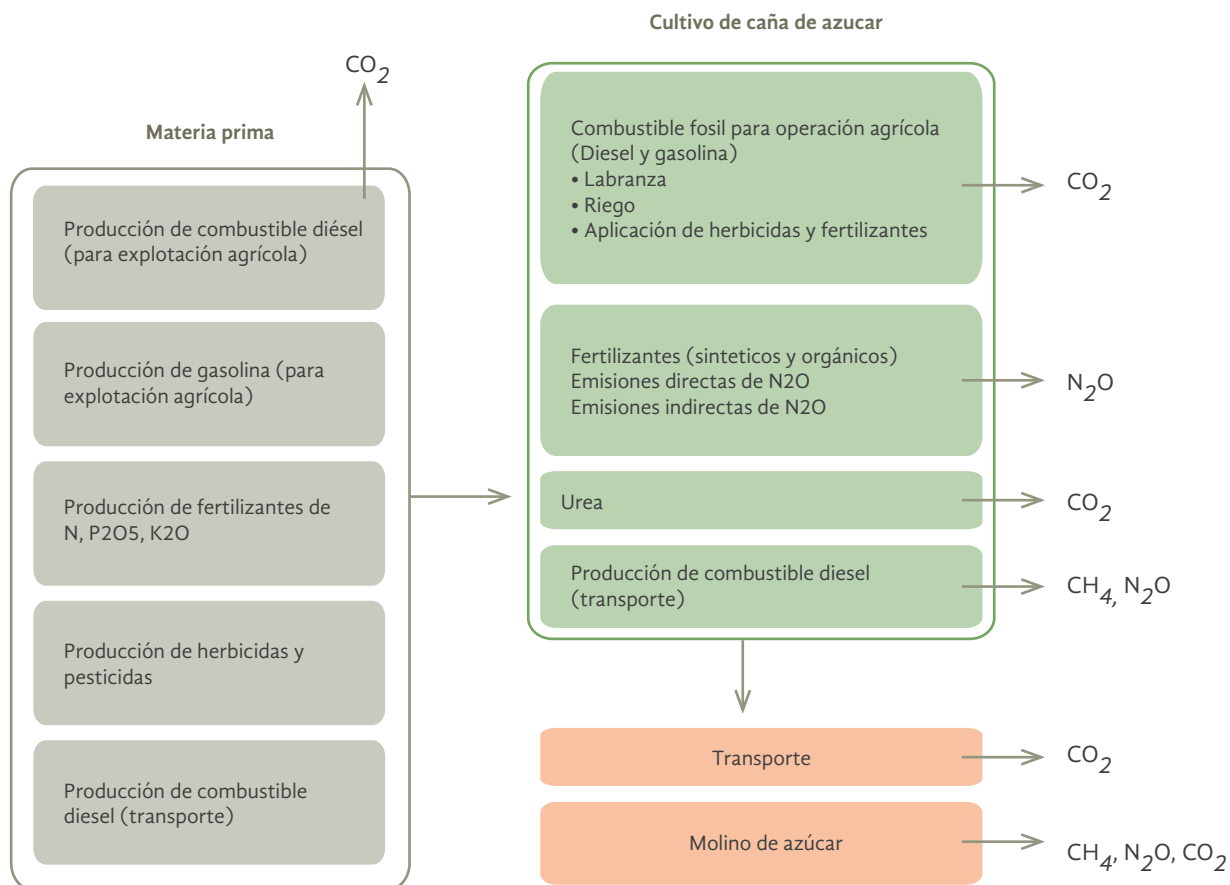


Figura 2. 1 Etapas y emisiones de GEI durante el ciclo de vida del azúcar
 Fuente: Adaptado de Andrade et al., (2015)

[40]

un excedente significativo. Se estima que entre el 50% y el 75% del N aplicado al campo no es utilizado por la planta y se pierde por lixiviación en el suelo (Hirel et al., 2011; Baresel et al., 2008; Snyder et al., 2009). Lo anterior resulta en la emisión de más de 3 $\text{MtN}_2\text{O-N}$ anuales (megatoneladas de nitrógeno en forma de óxido nitroso) desde tierras agrícolas (IPCC, 2019).

Por lo anterior, la estimación de la HC en la caña de azúcar se ha convertido en un tema de creciente interés, especialmente en regiones donde este cultivo tiene un peso importante, como en América Latina y Asia. En Brasil, el mayor productor de caña de azúcar con un poco más de 8,3 millones de ha, se han realizado evaluaciones que incluyen no solo las emisiones directas en campo, sino también las asociadas al cambio de uso de la tierra y la quema de residuos de cosecha. Barretto et al., (2010) realizaron un análisis de las actividades de dos ingenios azucareros durante la cosecha de 2006-2007, cuantificando la HC de la producción de azúcar aplicando el método del IPCC. Los resultados indicaron que se liberaron 241 kg de CO_2 equivalente por tonelada de azúcar producida, de los cuales el 44% de las emisiones totales provinieron de la quema de residuos, el 20% del uso de fertilizantes sintéticos y el 18% de la combustión de combustibles fósiles. Similares resultados fueron encontrados por Seabra et al., (2011), donde se encontró que la mayor parte de las emisiones de la producción de

azúcar se deben a la quema de residuos y al uso de fertilizantes sintéticos en la etapa agrícola.

En estudios realizados en Tailandia y México, se observa una tendencia consistente en la contribución significativa de la etapa agrícola a la huella de carbono en la producción de azúcar. Yuttitham et al. (2011) en Tailandia calcularon una huella de carbono total de 0.55 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$ de azúcar, con 0.49 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$ provenientes de la etapa agrícola, donde las principales fuentes de emisiones fueron los fertilizantes, los combustibles fósiles y la quema de biomasa. Similarmente, García et al. (2016) en México utilizando la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV), encontró que entre el 59% y 74% de las emisiones en la producción de azúcar provienen de la etapa agrícola, atribuibles principalmente a las emisiones de N_2O por la producción y uso de fertilizantes, y la quema de biomasa.

El Valle Geográfico del Río Cauca, principal zona de producción de caña de azúcar en Colombia ha sido objeto de diversos estudios sobre la HC. (Andrade et al., 2015) estimaron una huella de aproximadamente $947 \pm 1381 \text{ kg CO}_2\text{e/ha/ciclo}$ utilizando el método del IPCC, destacando que los fertilizantes nitrogenados contribuyen en un 73% a las emisiones. Lubo (2014) examinó las emisiones generadas durante la preparación del suelo, identificando que la mineralización del mismo es la principal fuente de emisiones, representando entre el 87%

y el 95% del total. Además, observó que las prácticas de fertilización y el uso de maquinaria agrícola también tienen un impacto significativo en las emisiones de gases de efecto invernadero. Téllez y Montoya (2014) señalaron que los fertilizantes, especialmente la urea, son responsables del 97.64% de la huella de carbono durante la fertilización. Cenicaña (2023) reportó emisiones de 131 kg CO₂eq/t azúcar en la etapa de campo, correspondiente al 37% de las emisiones de CO₂eq/t azúcar.

Estos resultados revelan consistentemente que la etapa de campo, y en particular la fertilización, es la principal fuente de emisiones de GEI en el cultivo de la caña de azúcar. Estudios como el de Umaña y Pulgarín (2013) refuerzan esta conclusión, al señalar que cultivos herbáceos como la caña, debido al uso intensivo de fertilizantes, emiten grandes cantidades de GEI sin fijar carbono, en contraste con cultivos como el cacao y el aguacate, que muestran un balance más positivo en términos de carbono.

De acuerdo con lo anterior, la estimación de la huella de carbono en la caña de azúcar ha empleado diversas metodologías, siendo la más reconocida la propuesta por el IPCC. Este enfoque se centra en la contabilización de las emisiones de GEI provenientes de actividades agrícolas y forestales, proporcionando directrices para el cálculo de factores de emisión específicos por actividad para cultivos como la caña de azúcar (IPCC, 2009). El presente estudio adoptará esta metodología, enfocándose exclusivamente en la etapa agrícola donde se concentran las mayores emisiones.

2.4 Cálculo de la Huella de Carbono del cultivo de la caña de azúcar en la CARC ²⁵

2.4.1 Metodología

El objetivo de esta sección es estimar la HC en la fase agrícola de producción de caña de azúcar en la Cuenca Alta del Río Cauca (CARC). Para este cálculo, en el estudio sólo serán incluidos las siguientes fuentes de emisiones: el combustible utilizado para el funcionamiento de la maquinaria agrícola, la aplicación de fertilizantes nitrogenados, las emisiones de óxido nitroso (N₂O) derivadas de la volatilización de fertilizantes nitrogenados (calculadas como el 1% del nitrógeno aplicado, según el IPCC, 2006) y la quema de caña durante la cosecha. Es importante destacar que el cálculo de la Huella de Carbono presentado en este estudio está subestimado. Teniendo en cuenta las dificultades para obtener información, quedan por fuera el uso de herbicidas, fungicidas, el bombeo para riego, la energía requerida para producir la maquinaria, así como el combustible necesario para transportar la caña cosechada a los ingenios donde se muele y procesan.

Para el desarrollo metodológico de estimación, las Directrices hacen uso del método más común, el cual consiste en combinar la información sobre el alcance hasta el cual tiene lugar una actividad

humana (denominado datos de la actividad o AD, del inglés Activity Data) con los coeficientes que cuantifican las emisiones o absorciones por actividad unitaria. Se los denomina factores de emisión (EF, del inglés, *Emission Factors*).

2.4.1.1 Fertilización nitrogenada

Para describir las emisiones de N₂O generadas por la aplicación de nitrógeno antropogénico o su mineralización, se consideran tanto las emisiones directas desde los suelos, como las indirectas a través de dos mecanismos principales. Primero, por la volatilización de amoníaco (NH₃) y óxidos de nitrógeno (NO_x) desde suelos manejados por la combustión de biomasa y combustibles fósiles, lo que provoca la redeposición de estos compuestos y sus derivados en suelos y cuerpos de agua. Segundo, por la lixiviación y escorrentía de nitrógeno, principalmente en forma de nitrato (NO₃⁻), desde los suelos tratados (IPCC, 2019).

Dado que las emisiones generadas por la urea son diferentes a las de los fertilizantes nitrogenados, para estimar las emisiones por fertilización con urea, el IPCC presenta la ecuación 2, en la cual se muestra que las emisiones totales de CO₂, generadas por la aplicación de urea, son iguales a la multiplicación de la cantidad de urea aplicada por el factor de emisión. Dado que no se cuenta con un factor de emisión propio, en este cálculo se empleó el factor de emisión propuesto por el IPCC.

Ecuación 2.2. Ecuación para el cálculo de las emisiones por fertilización con urea.

$$CO_2-C_{emisión} = M \times FE$$

Donde,

- M es la cantidad de fertilización con urea (Ton urea año⁻¹)
- FE es el factor de emisión. Ton C (ton de urea)⁻¹

En este caso, se aplicará un factor de emisión general de 0,20 ton de carbono para urea, que es equivalente al contenido de carbono de la urea sobre la base de su peso atómico (20% para CO (NH₂)₂). Finalmente, el resultado de las emisiones en forma de carbono (CO₂-C) se convierte a kilogramos de CO₂ multiplicando por el factor 44/12, que corresponde a la relación entre la masa molar del dióxido de carbono (CO₂) y la del carbono (C) presente en el compuesto (IPCC, 2007).

La estimación de la cantidad de urea empleada en la fertilización se obtuvo con base en los requerimientos nutricionales del cultivo, determinados a partir del rendimiento anual registrado en la zona de estudio. Este cálculo se sustentó en las recomendaciones técnicas para la aplicación de este fertilizante, establecidas por Cenicaña para la región²⁶.

25. Las bases de datos de los resultados de la HC se pueden apreciar en el Anexo 3.

26. Las bases de datos de los requerimientos de fertilizantes para el cálculo de la HC se pueden apreciar en el Anexo 3.

2.4.1.2 Uso de combustibles fósiles²⁷

Para llevar a cabo el cálculo de la huella de carbono por combustión móvil, se empleó la ecuación presentada en las directrices del IPCC de 2006 (ver ecuación 3), según la cual las emisiones son iguales a la sumatoria del combustible consumido multiplicada por el factor de emisión de dicho combustible. En el caso particular de este proyecto, se contabilizó la cantidad de combustible diésel consumido por cada tractor, en el desarrollo de cada labor de preparación del suelo y aplicación de fertilizante, y se multiplicó dicha cantidad por el factor de emisión para el diésel de **2,83 kg CO₂e/l** (IPCC, 2007).

Ecuación 2.3. Ecuación para el cálculo de las emisiones por uso de combustible fósil

$$E_{CO_2eq} = \sum_j C_j \times FE_j$$

Donde,

- E_{CO_2eq} son las emisiones de gases de efecto invernadero por uso de combustible fósil (kg CO₂eq).
- C es la cantidad de combustible consumido (l).
- FE es el factor de emisión para cada tipo de combustible, que se expresa en términos de emisiones de CO₂ por unidad de combustible consumido (kg CO₂/litro).

La cantidad de combustible consumido se estimó en función del área sembrada anualmente en la CARC y de los indicadores establecidos por los ingenios de la región para las labores de preparación del suelo. Con base en estos indicadores, se calculó el tiempo de operación de la maquinaria por hectárea para cada actividad de preparación. Posteriormente, utilizando los valores estimados de consumo de combustible por hora de operación, se determinó el total de litros consumidos para cada año²⁸.

2.4.1.3 Quema de caña de azúcar

Según Asocaña (2022), la cosecha de caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca se realiza de dos maneras: manual y mecanizada. En la primera, que es la forma más tradicional, se requiere una quema controlada del cultivo antes de que los corteros ingresen al campo. De acuerdo con Claudia Calero, directora de Asocaña, estas quemas controladas actualmente se realizan en el 20% de las hectáreas de caña en la región. Esto significa que en el 80 % de los terrenos distribuidos en cinco departamentos (Valle del Cauca, Cauca, Risaralda, Caldas y Quindío), no se realiza esta práctica.

Es así como la práctica de quema en los cultivos de caña de azúcar consiste en eliminar los residuos vegetales, como las hojas y tallos, antes o después de la cosecha. Durante esta actividad, se

liberan grandes cantidades de gases de efecto invernadero (GEI). De acuerdo con el IPCC (2007), la quema de biomasa en estos cultivos no solo libera CO₂, sino también otros gases de efecto invernadero y sus precursores, debido a la combustión incompleta del material. Entre ellos se incluyen monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM) y especies de nitrógeno, como el óxido nitroso (N₂O) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) (Levine, 1994). En los inventarios de emisiones, las zonas de cultivo y pastizales suelen contabilizar únicamente las emisiones no relacionadas con el CO₂, dado que se asume que las emisiones de CO₂ son compensadas por la regeneración de la vegetación en un periodo aproximado de un año (IPCC, 2006). Este principio también aplica al CO, que se oxida rápidamente y se transforma en CO₂ una vez en la atmósfera (IPCC, 2006).

Para calcular las emisiones por quema de biomasa se tuvo en cuenta las directrices del IPCC para este tipo de reportes: i) la eficiencia de combustión del rastrojo utilizada fue del 80%; ii) las emisiones de CO₂ debido al quemado de rastrojo no se contabilizaron como tales ya que se entiende que el CO₂ liberado durante el quemado vuelve a ser fijado a través del crecimiento del cultivo en el siguiente ciclo agrícola (IPCC, 2006); y iii) solo se consideraron la emisión de metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) ya que son los gases que tienen efecto invernadero directo (Crutzen y Andreae, 1990). La ecuación utilizada para el cálculo de las emisiones por quema de biomasa es la siguiente:

Ecuación 2.4 Ecuación para el cálculo de las emisiones por quema de biomasa.

$$L_{fuego} = A * MB * C_f * G_{ef} * 1/1000$$

Donde:

- L_{fuego} es cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero provocada por el fuego, ton de cada gas de efecto invernadero (GEI) (p. ej., CH₄, N₂O, etc.).
- MB es la masa de materia seca precosecha más postcosecha a ser quemada, (t/ha).
- C_f es el factor de combustión, adimensional y para quemas agrícolas equivale a 0.8.
- G_{ef} es el factor de emisión de materia seca quemada (g/kg).

Los cálculos se realizaron en función del área del cultivo y de la fracción del campo donde se practica la quema, utilizando factores de emisión específicos del cultivo de acuerdo con el IPCC. La siguiente tabla resume los factores de emisión y los componentes utilizados en el cálculo:

[42]

27. Las bases de datos de la estimación de la cantidad de combustible diesel utilizado para el cálculo de la HC se pueden apreciar en el Anexo 3.

28. Para la estimación de la cantidad de combustible utilizado por hora se asumieron tractores medianos (100 -230 hp), con un consumo estándar de 25 l/hr (Patiño, 2023, John Deere, s.f.).

Componentes	CH ₄	N ₂ O	Unidad	Fuente
Área quemada (A)	Anual	Anual	ha	Asocaña
Factor de emisión (Gef)	2,7	0,07	g/kg de materia seca	IPCC
Masa de biomasa para combustión (Mb)	6,5	6,5	Ton/ha	IPCC
Factor de combustión (Cf)	0,8	0,8	Adimensional	IPCC
Potencial de calentamiento global	21	310	Adimensional	IPCC

Tabla 2.5. Factores de emisión y datos utilizados para el cálculo de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero procedentes del cultivo de caña de azúcar
Fuente: IPCC, 2002 y Asocaña (2023)

Para convertir las emisiones de metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) a su equivalente en dióxido de carbono (CO₂e), se utilizan los potenciales de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) establecidos por el IPCC para un horizonte temporal de 100 años. Estos valores son: 21 para el CH₄, lo que significa que 1 kg de CH₄ es equivalente a 21 kg de CO₂e, y 310 para el N₂O, lo que indica que 1 kg de N₂O equivale a 310 kg de CO₂e.

Es importante resaltar que, las emisiones de CO₂ derivadas de la quema de biomasa no se consideran en los balances de carbono, ya que se asume que el CO₂ liberado durante la combustión es reabsorbido por las plantas de caña de azúcar en su ciclo de crecimiento en la siguiente temporada de cultivo (IPCC, 2007). Adicionalmente, Madriñán (2002) señala que la quema de una hectárea de caña de azúcar libera entre 12 y 20 toneladas de CO₂ y consume aproximadamente 1,2 toneladas de O₂ en el proceso de combustión. Sin embargo, durante su ciclo de crecimiento, la caña de azúcar absorbe cantidades significativamente mayores de CO₂.

El cálculo del área de caña de azúcar quemada se basó en la información obtenida de los informes de sostenibilidad ambiental de Asocaña (2021 y 2024), que proporcionan datos desde 2013 en adelante. Madriñán (2002) señala que la quema de caña comenzó en 1973, afectando aproximadamente el 80% del área cosechada. Para completar la serie histórica, los datos entre 1973 y 2012 se estimaron a partir de proporciones estadísticas. Desde entonces, y hasta aproximadamente 2003, la quema de caña, aunque controlada, fue uno de los principales métodos de cosecha. Posteriormente, la CVC, como autoridad ambiental, emitió una normativa que prohibió la quema extensiva, reduciendo significativamente las hectáreas afectadas (véase el Volumen N° 2).

2.5 Resultados y discusión ²⁹

El análisis del área destinada a la quema de caña de azúcar en los últimos años muestra una disminución significativa, tendencia que se ilustra en la Figura 2. 2 Área quemada de caña de azúcar en la zona azucarera de Colombia (hectáreas).

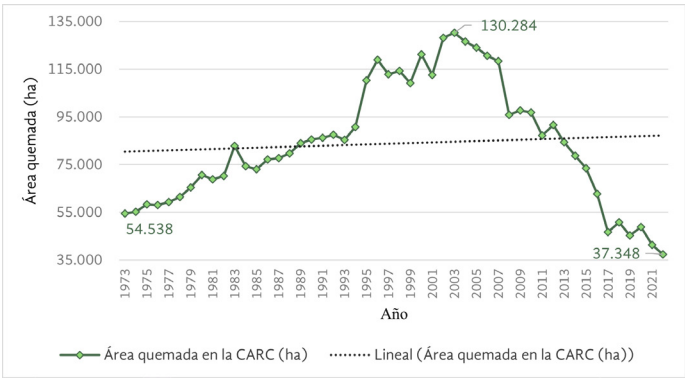


Figura 2. 2 Área quemada de caña de azúcar en la zona azucarera de Colombia (hectáreas) (1973 – 2022)
Fuente: Datos de 1973 a 2012 basados en Madriñán (2002) y proporciones estadísticas calculadas por los autores. Desde 2013, información tomada de Asocaña (2021, 2024) a partir de los reportes de área programada para quema

[43]

La figura evidencia un incremento sostenido en el área destinada a quema hasta alcanzar un máximo de 130.284 hectáreas en 2001. Posteriormente, se observa una reducción continua, que culmina en 2022 con un área programada de 37.348 hectáreas. Este descenso en la superficie programada para quema puede atribuirse principalmente a la adopción creciente de la cosecha mecanizada, lo cual ha reducido la dependencia de la quema en gran parte de las áreas de cultivo (Asocaña, 2022). No obstante, es importante enfatizar que estos datos corresponden únicamente a las áreas programadas para quema reportadas por los ingenios, en lugar de representar el área realmente quemada. Por lo tanto, no se incluyen incendios no reportados, incidentes ocasionados por factores externos o quemas ilegales. Estos eventos no contabilizados también pueden contribuir en los resultados de las emisiones de CO₂e.

De acuerdo con la Figura 2.3, los resultados del cálculo de la HC en el sistema de producción en la fase de campo de caña de azúcar en la CARC, desagregados por actividad específica, evidencian patrones diferenciados en las emisiones CO₂e a lo largo del periodo 1973-2022. La fertilización nitrogenada representa una de las principales fuentes de emisión, alcanzando hasta 50.000 toneladas de CO₂e en años recientes. Según Urrea (2024), es común que los agricultores

29. Las bases de datos de estos resultados se pueden observar en el Anexo 3 “Huella de Carbono del cultivo de Caña de azúcar en la CARC”

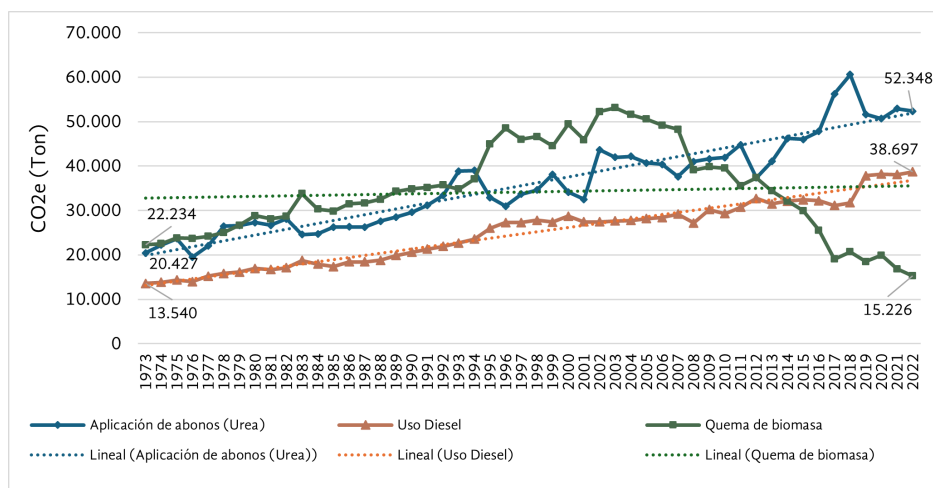


Figura 2.3 Emisiones de CO_2e por actividad en el cultivo de caña de azúcar en la CARC (1973-2022)

Fuente: cálculos propios.

apliquen entre 7 y 14 bultos de urea por hectárea, excediendo las necesidades nutricionales del cultivo y derivando en un uso intensivo de este abono. En comparación, el uso de diésel muestra un crecimiento moderado, manteniéndose entre 10.000 y 20.00 toneladas de CO_2e , que refleja un consumo constante y creciente de combustibles fósiles en maquinaria. La quema de biomasa, aunque variable, ha presentado picos que superan las 60.000 toneladas, pero ha mostrado una tendencia decreciente en los últimos años, atribuida al aumento de la cosecha mecanizada en lugar de la cosecha por quema como se mencionó anteriormente.

Los resultados obtenidos en este estudio coinciden parcialmente con los hallazgos de Andrade et al. (2015) y Yuttitham et al. (2011), quienes también identificaron la fertilización nitrogenada como una de las principales fuentes de emisiones de CO_2e en sistemas de producción de caña de azúcar. Por otra parte, el uso de diésel contribuye de manera significativa a las emisiones, con un patrón de crecimiento similar, aunque sus estimaciones indican un rango más amplio, que oscila entre 15.000 y 25.000 toneladas de CO_2e al año, lo que podría deberse a variaciones en el uso de maquinaria agrícola y las técnicas de manejo de residuos.

Seguidamente, en cuanto al total de GEI, la Figura 2.4 muestra la

tendencia de las emisiones anuales de CO_2e en la producción de caña de azúcar en la CARC a lo largo del periodo 1973-2022. Este indicador corresponde realmente al indicador de presión del cultivo de caña de azúcar sobre el aire y el clima. En términos generales, se observa un crecimiento en las emisiones hasta aproximadamente el año 2000, cuando se alcanza un pico que supera las 123.186 toneladas de CO_2e , seguido de una disminución gradual en los años posteriores. Sin embargo, la línea de tendencia lineal superpuesta sugiere una inclinación ascendente a lo largo del periodo total, lo cual indica un aumento total de las emisiones, a pesar de las fluctuaciones observadas en la serie. El comportamiento ascendente hasta finales de los años 90 podría asociarse con la intensificación de prácticas agrícolas y el aumento en el uso de insumos como fertilizantes nitrogenados y combustibles fósiles, coincidiendo con una etapa de expansión del cultivo que conllevó al aumento del área sembrada y de la producción de caña de azúcar. Sin embargo, el descenso en las emisiones desde el año 2000 en adelante refleja la disminución en la práctica de quema de biomasa durante la cosecha, como respuesta a las nuevas normativas por parte de las autoridades ambientales de la región.

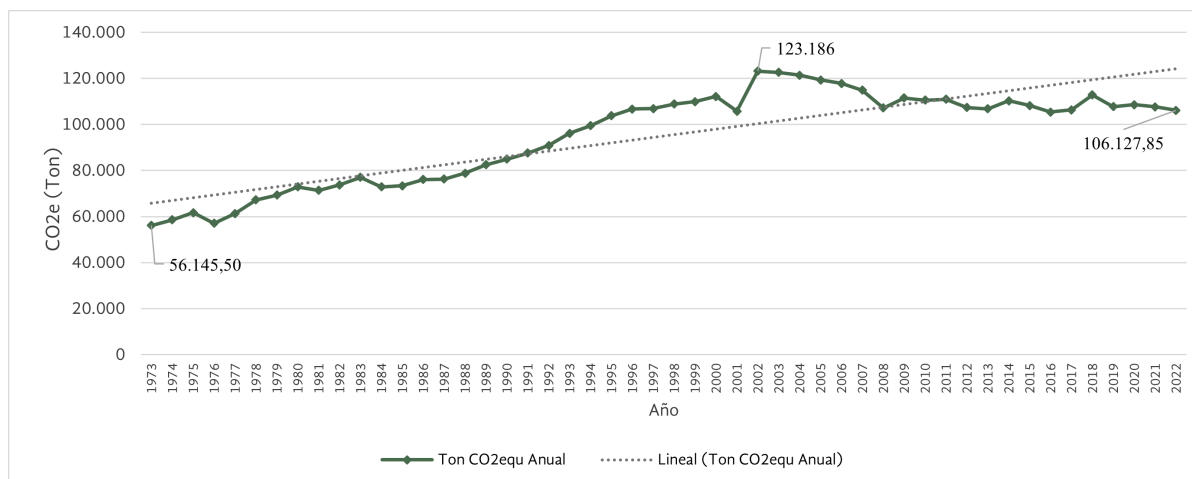


Figura 2.4 Huella de Carbono anual del cultivo de caña de azúcar en la CARC (toneladas) (1973-2022)

Fuente: cálculos propios

Por otra parte, el análisis de crecimiento de la HC con relación al año inicial y final (1973 -2022) revela aspectos importantes. Como se presenta en la tabla 2.6, hay un marcado aumento en el uso de diesel para maquinaria, con un crecimiento absoluto de 25.156 toneladas de CO₂e y un incremento promedio anual del 2,2%. Asimismo, la fertilización muestra un crecimiento del 61% y un aumento anual del 1,9%, reflejando una intensificación en el uso de insumos químicos que, aunque mejora la productividad, incrementa las emisiones de gases de efecto invernadero y las presiones ambientales. En contraste, la quema de biomasa disminuyó en 7.008 toneladas de CO₂e, con una tasa de crecimiento total negativa del -46% y un promedio anual de -0,8%, lo cual de acuerdo con lo mencionado anteriormente es debido a la disminución del área quemada. Aunque el balance general de emisiones totales ha aumentado, las tasas por hectárea y por tonelada han disminuido un 23% y 112%, respectivamente.

En cuanto a las emisiones totales están presentaron un aumento del 47% en el período analizado, lo que equivale a un crecimiento absoluto de 49.982 toneladas de CO₂e y una tasa de crecimiento anual del 1,3%. Este incremento en las emisiones totales pone de manifiesto que, si bien ciertas prácticas han mejorado en términos de sostenibilidad, como la reducción de la quema de biomasa, el aumento en el uso de maquinaria y fertilizantes ha contribuido de forma significativa al alza de las emisiones. Estos resultados sugieren que, aunque la producción de caña de azúcar ha mejorado en eficiencia (como lo reflejan las menores emisiones por hectárea y por tonelada), el desafío de reducir el impacto ambiental en la región persiste, especialmente en lo que respecta a la dependencia de insumos fósiles y químicos.

Como era de esperarse, las actividades agrícolas basadas en la agricultura industrializada y la revolución verde, ejercen un impacto

significativo en el cambio climático debido a la emisión considerable de gases de efecto invernadero (GEI). Investigaciones nacionales similares se han realizado en otras cadenas productivas; por ejemplo, Andrade et al. (2014) identificaron elevadas emisiones de GEI en los cultivos de arroz en Huila, Colombia, con un promedio de 1,0 t CO₂e/ha por ciclo. Asimismo, Umaña (2012) determinó que ciertos sistemas agrícolas, como los de cacao-plátano, maíz y caña de azúcar en Falan (Tolima), presentan una HC negativa neta, con valores de 0,7 a 1,3 t CO₂e/ha por año, siendo este último el valor atribuido específicamente al cultivo de caña de azúcar. Un hallazgo comparable fue reportado por Andrade et al. (2015), quienes evaluaron la HC en la producción de caña de azúcar en Palmira, Valle del Cauca. En su estudio, estimaron que este cultivo emite aproximadamente 1,3t CO₂e/ha por ciclo.

En nuestro estudio, se determinó que la HC unitaria del cultivo de caña de azúcar en la CARC alcanzó 1,8 t CO₂e por hectárea al final del período de análisis (2022). Como se observa en la Figura 2.5, este valor ha experimentado variaciones a lo largo del tiempo, evidenciando una tendencia general a la baja, con una disminución aproximada del 48%, pasando de 2,25 a 1,18 t CO₂e por hectárea. Este comportamiento puede explicarse, en parte, por el aumento sostenido del área sembrada. Aunque la expansión del área cultivada ha resultado en un incremento en la cantidad total de emisiones de CO₂e, la HC unitaria (Ton CO₂e/ha) ha mostrado una reducción significativa. Este comportamiento sugiere una posible mejora en la eficiencia de producción y en el manejo de los recursos por unidad de superficie. Sin embargo, esta reducción estaría principalmente vinculada a la disminución de las prácticas de quema previa a la cosecha.

[45]

Actividad	1973	2022	Crecimiento Absoluto	Factor de Crecimiento	Tasa de crecimiento total (%)	Tasa de crecimiento promedio anual geométrico (%)
Diesel para maquinaria (ton CO2e)	14	39	25	2,86	65	2,2
Fertilización (ton CO2e)	20	52	32	2,56	61	1,9
Quema de biomasa (ton CO2e)	22	15	-7	0,68	-46	-0,8
Total (ton CO2e)	56	106	50	1,89	47	1,3
Total ton CO2e/ha	0,5	0,4	-0,093	0,81	-23	-0,4
Total tonCO2e/ton	0,008	0,004	-0,004	0,47	-112	-1,5

Tabla 2.6 Tasas de crecimiento total y anual de las variables de producción y Huella de Carbono total de la caña de azúcar en la CARC (1973-2022)
Fuente: cálculos propios.

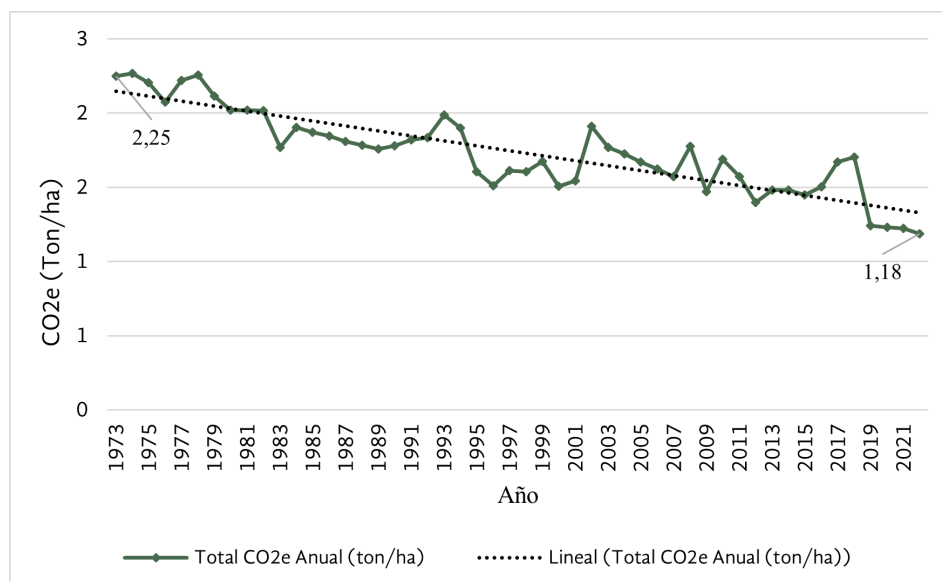


Figura 2. 5 Huella de Carbono anual del cultivo de caña de azúcar en la CARC (toneladas por hectárea)

Fuente: cálculos propios.

[46]

Al comparar estos resultados con estudios nacionales previamente mencionados, reflejan una consistencia en las emisiones reportadas para otros sistemas agrícolas y para el cultivo de caña de azúcar en la región. A nivel internacional, Brasil, como principal productor de caña de azúcar en el mundo, ha sido objeto de diversos estudios. Uno de los más destacados, realizado por Barretto De Figueiredo (2010), reportó una huella de carbono de 2,4 toneladas de CO_2e por hectárea, siendo la quema de residuos agrícolas la principal fuente de emisiones. En Tailandia, se evaluaron las emisiones en las distintas fases de producción de azúcar, encontrándose que en la fase agrícola de la producción de caña de azúcar se emiten aproximadamente 2,1 toneladas de CO_2e por hectárea. En este caso, la aplicación de fertilizantes nitrogenados y el consumo de diésel representan los mayores contribuyentes a las emisiones.

Estos hallazgos subrayan el impacto de la intensificación del uso del suelo en la HC. Zambrano, Franquis y Infante (2004) destacan que, en sistemas de cultivo convencionales, la perturbación del suelo y del entorno disminuye la fertilidad y aumenta la contaminación ambiental. En el contexto de la HC, señalan que para mejorar el secuestro de carbono es fundamental implementar prácticas de manejo sostenibles, como la reducción en el uso de fertilizantes químicos y plaguicidas, lo cual contribuye a minimizar los efectos negativos sobre el ambiente. Considerando los resultados obtenidos, y como lo afirma Umaña (2012), el cultivo de caña de azúcar presenta elevadas emisiones de carbono, principalmente debido a las prácticas agrícolas tradicionales asociadas a la revolución verde. Estas emisiones están relacionadas con el uso intensivo de fertilizantes nitrogenados durante la etapa de producción y el empleo de combustibles fósiles en las labores agrícolas.

Los resultados obtenidos en el análisis evidencian cómo la evolución de las prácticas agrícolas influye directamente en las emisiones de CO_2 , destacándose que la ausencia o implementación de ciertas técnicas puede tener un impacto significativo. Un ejemplo claro es la

disminución de la quema de biomasa, que ha registrado una reducción del 46% desde 2001, atribuida principalmente a la incorporación de tecnologías de mecanización en las labores agrícolas. Considerando lo señalado en estudios como los de Madriñán Palomino (2002) y Urbano Silva (2014), esta práctica conlleva impactos negativos sobre el ambiente y la salud pública debido a las emisiones de partículas suspendidas y GEI. Sin embargo, este avance se contrarresta parcialmente por la persistente dependencia de fertilizantes nitrogenados, que representan la mayor fuente de emisiones de CO_2e en el sistema (50,000 toneladas anuales). Este patrón, consistente con el trabajo de Andrade et al. (2015), refleja un uso intensivo de estos insumos, exacerbado por la sobreaplicación de urea documentada en la región, lo que no solo eleva las emisiones, sino que también limita la sostenibilidad general del sistema. Además, el uso de combustibles fósiles en maquinaria, con un incremento promedio anual del 2.2%, mantiene una presión significativa sobre la HC.

Por otra parte, en el contexto de estas dinámicas, el análisis de Grajales y Giraldo (2023) resalta cómo los ingenios azucareros en Colombia manejan y reportan las actividades relacionadas con el impacto ambiental. En lo que refiere a la quema de caña, se evidencia una dualidad: mientras algunos informes destacan el aumento de áreas cosechadas mecánicamente como una medida para reducir la quema, otros minimizan el impacto ambiental de esta práctica. Ingenios como Riopaila-Castilla (2012) incluso trasladan la responsabilidad de estas emisiones a pequeños productores campesinos, mientras reconocen indirectamente los efectos negativos de la quema en la biodiversidad y la calidad del aire. Aunque se enfatiza el monitoreo de las emisiones y el cumplimiento de la normativa ambiental, la narrativa adoptada en los informes sugiere un enfoque más orientado al cumplimiento regulatorio que a un reconocimiento integral del impacto ambiental negativo de estas actividades.

Este estudio se enfocó en calcular la HC durante la fase agrícola de la producción de caña de azúcar, considerando únicamente la aplicación de fertilizantes nitrogenados, el consumo de diésel y la quema de residuos agrícolas como las principales fuentes de emisión. Sin embargo, la falta de información sobre otros factores relevantes, como el uso de energía para riego y la aplicación de herbicidas, limita la precisión de la estimación. Igualmente, los requerimientos energéticos para la producción de estos insumos y de la maquinaria y equipos son otros factores que contribuyen a la subestimación de nuestros cálculos. Adicionalmente, se utilizaron exclusivamente fuentes secundarias para este análisis, lo que resalta la necesidad de estudios que incluyan datos primarios y mediciones en campo para evaluar de manera más precisa el impacto ambiental del cultivo.

Es importante señalar que la fase agrícola representa solo una parte del ciclo de vida del cultivo de caña de azúcar. La fase industrial, que abarca procesos como el transporte hacia el ingenio, la molienda, la

producción y quema de bagazo, la evaporación y cristalización del jugo de caña, así como el uso de combustibles fósiles en maquinaria, también contribuye significativamente a las emisiones de CO₂. Aunque, en este estudio no se hayan tenido en cuenta, para una comprensión integral del impacto ambiental de la caña de azúcar, es importante realizar un análisis que considere tanto la fase agrícola como la industrial, lo que permitiría obtener resultados más completos. Sin embargo, este presente estudio representa un avance significativo al ofrecer una aproximación detallada que sienta las bases para estudios futuros más completos y robustos. En resumen, mientras que la sostenibilidad del sistema ha avanzado, especialmente en la reducción de emisiones directas, persisten desafíos estructurales que deben abordarse para consolidar un modelo agrícola que sea ambientalmente sostenible y contribuya a la mitigación del cambio climático.

2.6 Referencias

Allan, J. A. (1998). Virtual Water: A Strategic Resource Global Solutions to Regional Deficits. *Groundwater*, 36(4), 545–546. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02825.x>

Alexander Umaña, J., & Conde Pulgarín, A. (2013). *Huella de carbono en los sistemas de producción agrícola dominantes en el municipio de Falan*, Tolima. *Revista Ciencia Animal*, 6, 11–27.

Allen, R. G. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Vol. 56). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Estudio FAO Riego y Drenaje, 2006.

Álvarez-Pugliese, C. E., Machuca-Martínez, F., & Pérez-Rincón, M. (2021). Water footprint in gold extraction: A case-study in Suarez, Cauca, Colombia. *Heliyon*, 7(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07949>

Andrade, H., Segura, M., & Varona Juan Pablo. (2015). Estimación de huella de carbono del sistema de producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en Palmira, Valle del Cauca, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(1), 19–27.

Andrade, H.J., Campo, O., & Segura M.A. (2014). Huella de carbono del sistema de producción de arroz (*Oryza sativa*) en el municipio de Campoalegre, Huila, Colombia. *Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecu.* 15(1), 25–31.

Arévalo, D. (2012). Una mirada a la agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica. <https://www.wwf.org.co/?249918/Una-mirada-a-la-agricultura-de-Colombia-desde-su-Huella-Hidrica>

Asocaña. (2021). Informe de sostenibilidad 2020. Obtenido de <https://www.asocana.org/modules/documentos/2/313.aspx>.

Baresel, J. P., Zimmermann, G., & Reents, H. J. (2008). Effects of genotype and environment on N uptake and N partition in organically grown winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in Germany. *Euphytica*, 163(3), 347–354. <https://doi.org/10.1007/s10681-008-9718-1>

Barretto De Figueiredo, E., Panosso, A. R., Romão, R., & Scala, N. La. (2010). Greenhouse gas emission associated with sugar production in southern Brazil. In *Carbon Balance and Management* (Vol. 5). <http://www.cbjournal.com/content/5/1/3>

Chapagain, A. K. (2017). Water Footprint: State of the Art: What, Why, and How? In *Encyclopedia of Sustainable Technologies* (pp. 153–163). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10164-2>

Chukalla, A. D., Krol, M. S., & Hoekstra, A. Y. (2018). Grey water footprint reduction in irrigated crop production: Effect of nitrogen application rate, nitrogen form, tillage practice and irrigation strategy. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(6), 3245–3259. <https://doi.org/10.5194/hess-22-3245-2018>

Cruz, J. R. (2015). Manejo Eficiente del Riego en el Cultivo de Caña de azúcar en el Valle Geográfico del Río Cauca (Vol. 1). Cenicaña.

- Crutzen, P. J., & Andreae, M. (1990).** Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles estimates of worldwide biomass burning. *Science*, 250(4988), 1669–1678. <https://doi.org/10.1126/science.250.4988.1669>
- Erçin, E., & Hoekstra, A. (2012).** Carbon and water footprints: Concepts, methodologies and policy responses. (World Water Assessment Programme; No. 4). United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).
- Espíndola, C., & Valderrama, J. (2012).** Huella del Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas. *Información tecnológica*, 23(1), 163–176. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642012000100017>
- Franke, N. A., Boyacioglu, H., & Hoekstra, A. Y. (2013).** Grey water footprint accounting: Tier 1 supporting guidelines.
- García, C. A., García-Treviño, E. S., Aguilar-Rivera, N., & Armendáriz, C. (2016).** Carbon footprint of sugar production in Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2632–2641. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.113>
- Grajales, J., & Giraldo, X. (2023).** Información ambiental versus impacto ambiental. Análisis de la información ambiental divulgada por los ingenios azucareros en Colombia. *Contaduría Universidad de Antioquia*, 83, 13–36. Doi: <https://doi.org/10.17533/udea.rc.n83a01>
- Gleick, P. H. (2000).** A Look at Twenty-first Century Water Resources Development. *Water International*, 25(1), 127–138. <https://doi.org/10.1080/02508060008686804>
- Hirel, B., Tétu, T., Lea, P. J., & Dubois, F. (2011).** Improving nitrogen use efficiency in crops for sustainable agriculture. *Sustainability*, 3(9), 1452–1485. <https://doi.org/10.3390/su3091452>
- Hodson, E., Castaño, J., Poveda, G., Roldán, G., & Chavarriaga, P. (2017).** Seguridad alimentaria y nutricional en Colombia. In *Retos y oportunidades de la seguridad alimentaria y nutricional en las Américas. El punto de vista de las Academias de Ciencias* (pp. 222–249). La Red Interamericana de Academias de Ciencias (IANAS).
- Hoekstra, A. Y. (2003).** Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade Value of Water Edited by. IHE Delft.
- Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2007).** Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. In *Integrated Assessment of Water Resources and Global Change* (pp. 35–48). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5591-1_3
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011).** The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/https://doi.org/10.4324/9781849775526>
- Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M., & Mekonnen, M. (2011).** The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard. Earthscan. www.earthscan.co.uk
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (s.f.).** Gases de Efecto Invernadero, GEI. <http://www.siac.gov.co/web/siac/climaticogei>
- IPCC. (2022).** Annex II: Glossary [Möller, V., R. van Diemen, J.B.R. Matthews, C. Méndez, S. Semenov, J.S. Fuglestedt, A. Reisinger (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2897–2930, doi:10.1017/9781009325844.029
- Jamshidi, S., Imani, S., & Delavar, M. (2022).** An approach to quantifying the grey water footprint of agricultural productions in basins with impaired environment. *Journal of Hydrology*, 606. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127458>
- John Deere. (s. f.).** Tractores Medianos. Recuperado el 20 de noviembre de 2024, de <https://www.deere.com/latin-america/es/tractores/tractores-medianos/>
- Lubo, C. M. (2014).** Cálculo de la huella de carbono en los procesos de preparación de suelo para un cultivo de caña de azúcar del valle del cauca [Tesis de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Magister en Ingeniería Industrial]. Universidad Icesi.
- Madriñán Palomino, C. E. (2002).** Compilación y análisis sobre contaminación del aire producida por la quema y la requema de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en el Valle geográfico del río Cauca. Trabajo de grado, Especialización en Agroecología, Universidad Nacional de Colombia, Palmira.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011).** The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577–1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- Moore III, B. (2002).** Chapter 2 Challenges of a changing earth. In, *Challenges of a Changing Earth* (W. Steffen, J. Jaeger, D.J. Carson, and C. Bradshaw, eds). Berlin: Springer-Verlag. Pp. 7–17
- Ovalle Barros, M. J. (2012).** Estimación de la Huella Hídrica de cultivos con potencial bioenergético en la provincia de Limarí, región de Coquimbo, Chile [Memoria para optar al título profesional de Ingeniera en Recursos Naturales Renovables]. Universidad de Chile.
- Patino Ordoñez, D. W. (2023).** Simulación del consumo de combustible en maquinaria agrícola usando las herramientas de Simscape y Driveline de MATLAB (Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico Automotriz). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.
- Pérez, M. A., Peña, M. R., & Alvarez, P. (2011).** Agro-industria cañera y uso del agua: análisis crítico en el contexto de la política de agrocombustibles en Colombia. *Ambiente & Sociedade*, XIV(2), 153–178.

- Quintero Durán, R. (1993).** Interpretación del Análisis de Suelo y Recomendaciones de Fertilizantes para la Caña de Azúcar. In CENICAÑA.
- Quintero Durán, R. (1997).** *Fertilización Nitrogenada En Caña de Azúcar.*
- Quintero Durán, R. (1999).** Extracción de Nutrimientos por la Caña de Azúcar. Carta Trimestral, 2.
- Ramírez, L. F., Becerra, D., & Mora, C. H. (n.d.).** Huella hídrica verde y azul de la producción de caña de azúcar orgánica en la zona centro del Valle del Cauca. Ingeniería y Competitividad: Revista Científica y Tecnológicas. <https://doi.org/10.25100/iyc.v24i2.11264>
- Renderos, R. (2014).** Huella Hídrica del Cultivo de Caña de Azúcar. <https://www.researchgate.net/publication/303939723>
- Rivera Aguilar, R., & García Gómez, L. (s.f.).** *Diagnóstico de la huella de carbono en la producción y procesamiento de la caña de azúcar, caso Central Progreso.* Central Progreso S.A. de C.V.
- Riopaila-Castilla. (2012).** Informe de sostenibilidad. Riopaila Castilla. <https://www.riopaila-castilla.com/informes-de-sostenibilidad-y-gestion/>
- Rodríguez, J. P., Ruiz-Ochoa, M. A., & Meneses, A. (2020).** Revisión de los factores de emisión en las metodologías de huella de carbono en Colombia. *Espacios*, 41(47), 74-84.
- Rosegrant, M., & Ringler, C. (2000).** Impact on food security and rural development of transferring water out of agriculture. *Water Policy*, 1(6), 567-586. [https://doi.org/10.1016/S1366-7017\(99\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S1366-7017(99)00018-5)
- Scarpore, F. V., Hernandes, T. A. D., Ruiz-Corrêa, S. T., Kolln, O. T., Gava, G. J. D. C., Dos Santos, L. N. S., & Victoria, R. L. (2016).** Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4576-4584. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.107>
- Seabra, J. E. A., Macedo, I. C., Chum, H. L., Faroni, C. E., & Sarto, C. A. (2011).** Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(5), 519-532. <https://doi.org/10.1002/bbb.289>
- Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L., & Fixen, P. E. (2009).** Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. In *Agriculture, Ecosystems and Environment* (Vol. 133, Issues 3-4, pp. 247-266). <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.021>
- Sun, Y., Wang, Z., Lee, L. C., Li, X., & Wang, Y. (2022).** A bibliometrics review of hotspots in water footprint research based on co-words network analysis. In *Frontiers in Environmental Science* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1027936>
- Téllez, C. M., & Montoya, M. C. (2014).** Estimación de la huella de carbono generada durante la labor de fertilización en una hectárea de cultivo de caña de azúcar en un ingenio del valle del cauca. [Proyecto de grado presentado para optar por el título de Ingeniero Industrial]. Universidad Icesi.
- Urbano Silva, L. (2014).** Consecuencia ambiental de la quema extensiva de la caña de azúcar. Trabajo de investigación formativa en Diseño Industrial, Universidad del Valle, Colombia.
- Vale, R. L., Netto, A. M., Toríbio de Lima Xavier, B., de Lâvor Paes Barreto, M., & Siqueira da Silva, J. P. (2019).** Assessment of the gray water footprint of the pesticide mixture in a soil cultivated with sugarcane in the northern area of the State of Pernambuco, Brazil. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 234, pp. 925-932). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.282>
- Wackernage, M., & Rees, W. E. (1996). *Our Ecological Footprint Reducing Human Impact on the Earth.* New Society Publishers.
- Wiedmann, T., & Minx, J. (2008).** A Definition of 'Carbon Footprint'. In: *Ecological Economics Research Trends: Chapter 1* [Pertsova, C.C.(ed.)]. Nova Science Publishers, Hauppauge NY, USA, pp. 1-11 (https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=5999).
- Wu, M., Cao, X., Ren, J., Shu, R., & Zeng, W. (2021).** Formation mechanism and step effect analysis of the crop gray water footprint in rice production. *Science of the Total Environment*, 752. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141897>
- Yu, N., Wang, B., Ren, B., Zhao, B., Liu, P., & Zhang, J. (2024).** Water and nitrogen footprint assessment of integrated agronomic practice management in a summer maize cropping system. *Journal of Integrative Agriculture*, 23(10), 3610-3621. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.03.061>
- Yuttitham, M., Gheewala, S. H., & Chidthaisong, A. (2011).** Carbon footprint of sugar produced from sugarcane in eastern Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 19(17-18), 2119-2127. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.017>



Capítulo 3: Colombia (1960-2022)

La Huella Ecológica del cultivo de caña de azúcar en la CARC,

[50]

La presente sección aborda la Huella Ecológica (HE) como un indicador biofísico relevante a la hora de evaluar el impacto ambiental, en términos de uso del suelo de la producción agrícola de caña de azúcar en la CARC. Para ello, se realiza una definición general del concepto y posteriormente, una pequeña revisión de literatura sobre la HE en la agricultura y en los cultivos de caña de azúcar. A partir de esta estructura, se identifican las principales metodologías para calcular la HE, se selecciona la más adecuada para este caso de estudio y se estima la HE del monocultivo de caña de azúcar en la CARC. Por último, se presentan los resultados de estos hallazgos y sus conclusiones.

3.1 Definición

El concepto de Huella Ecológica (HE), desarrollado en los años 90 por Mathis Wackernagel y William Rees, surgió como una de las respuestas científicas ante la preocupación por los crecimientos económico y de consumo de recursos, dado que estos dos tensores provocan que la Tierra supere su capacidad para regenerar los RRNN y absorber los residuos (véase Anexo: Funciones de la Naturaleza). Por ello, la Huella Ecológica se define como «el área de territorio ecológicamente productivo (cultivos, pastos, bosques o ecosistemas acuáticos) necesaria para producir los recursos utilizados y para asimilar los residuos producidos por una población dada con un modo de vida específico de forma indefinida» (Wackernagel & Rees, 1996, p. 9).

Desde sus formulaciones iniciales, la HE buscó integrar diversas dimensiones de los impactos ambientales en una sola medida comprensible, y se planteó como una herramienta que pudiera ser utilizada en diferentes escalas y contextos, desde la evaluación de la sostenibilidad de un país entero hasta análisis específicos a nivel local y hasta individual. Esta herramienta es un indicador biofísico de sustentabilidad que mide el impacto humano sobre los ecosistemas naturales en términos de superficie terrestre (área) o acuática (volumen), y se ha

convertido en uno de los mecanismos más utilizados por la Economía Ecológica al evaluar la presión de las actividades antropogénicas sobre la biósfera.

La Figura 3.1 muestra las superficies ecológicamente productivas que analiza la HE. En esencia, son territorios necesarios para que la población conserve su modo de vida de manera indefinida tanto en términos de provisión de recursos, como de absorción de residuos. Cada nivel de la ilustración corresponde a:

- Superficie de cultivos: Es el área agrícola destinada a la producción de biomasa. Este tipo de superficie incluye cultivos y plantaciones que satisfacen la demanda de alimentos y otros productos vegetales de la población (ha/hab/año).
- Superficie de mar productivo: Esta zona representa el área marina necesaria para obtener recursos pesqueros y otros bienes del mar (m3/hab/año).
- Superficie para generar energía: Es el territorio dedicado a la producción de energía a partir de fuentes fósiles, eólicas, hidráulicas, solares, nucleares, etc., que requieren grandes extensiones de área (ha/hab/año).
- Superficie de terreno urbanizado: Se refiere al área de tierra utilizada para la infraestructura urbana y el desarrollo residencial, industrial y comercial. La expansión urbana sobre el territorio natural, necesario para albergar a la población, genera presiones directas sobre los ecosistemas locales (ha/hab/año).
- Superficie de absorción de CO₂: Este contiene a las áreas naturales, como bosques y zonas vegetales, que absorben dióxido de carbono. Es crucial para mitigar el Cambio Climático, pues estos terrenos capturan parte de las emisiones de CO₂ generadas por actividades humanas. También incluye el área de absorción de materia degradada por la producción y consumo de bienes y servicios (ha/hab/año).



Figura 3. 1 Superficies incluidas en el cálculo de la Huella Ecológica
Fuente: elaboración propia con base en Wackernagel & Rees (1996)

En conjunto, estas superficies ilustran los diferentes usos del territorio ecológicamente productivo para soportar los modos de vida de una población definida. Este análisis es la base de la HE, considerada como un indicador versátil y accesible que evalúa la cantidad de territorio —extensión de tierra— necesario para satisfacer las necesidades humanas de forma sostenible.

Ahora bien, el cálculo de este indicador se basa en la premisa de que *cada actividad humana requiere un espacio en la biósfera para producir recursos y absorber residuos* (Global Footprint Network, 2020). Así, cuando la demanda de recursos es mayor que la capacidad de regeneración de la Tierra se produce un «déficit ecológico» que, en otras palabras, significa que la humanidad está haciendo uso de una cantidad de recursos a un ritmo superior al que la naturaleza es capaz de reponer o regenerarlos, amenazando la sustentabilidad del sistema. En ese sentido, como afirma Martínez-Castillo:

«El concepto y procedimiento de cálculo de la Huella Ecológica es consistente con un modelo de relaciones entre el sistema económico y la biósfera en el que existe un límite máximo que se define como capacidad de carga del planeta (Wackernagel, 2001) o escala de la economía (Daly, 1991), que no debe ser superada para evitar la entrada en una fase de sobreexplotación» (Martínez-Castillo, R., 2007, p. 13).

Aunque la HE considera cinco superficies principales, metodológicamente existen múltiples variaciones en su aplicación, por lo que el cálculo puede adaptarse a una sola superficie o incluso a una actividad específica. Esta adaptabilidad permite evaluar impactos en distintos contextos y ajustarse a necesidades específicas de los

estudios que se desarrollen. La fórmula general de la HE desarrollada por Wackernagel y Rees (1996) se expresa en la Ecuación 3.1 y se desarrolla a continuación.

Ecuación 3.1 Fórmula General de la Huella Ecológica.

$$HE = \frac{\text{Total de consumo de recursos} + \text{total generación de desechos}}{\text{Capacidad de producción por área (ha)}}$$

[51]

Para calcular esta función es necesario, en un primer momento, recopilar información sobre el **consumo de RRNN**; estos pueden ser alimentos, energía, materiales, etc., así como sobre la generación de desechos, incluyendo las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Posteriormente, cada tipo de *recurso* y *desecho* es convertido en una unidad de área (ha) utilizando factores de conversión específicos para cada uno³⁰. Por ejemplo, para el caso de la energía como recurso, se calcula el área necesaria para generar la energía consumida, considerando la eficiencia de las fuentes que la producen; mientras que para el caso de las emisiones de GEI como desecho, se calcula el área requerida para capturar estas emisiones, tomando en cuenta la capacidad de los ecosistemas para absorber carbono o GEI.

Después de realizar estas conversiones y unificar los indicadores en unidades de área, éstas son sumadas para obtener la HE total. Este resultado es finalmente comparado con la información sobre la *capacidad de carga* del territorio (que es la cantidad de área disponible que puede regenerar recursos y asimilar desechos) con el fin de definir si se están utilizando más recursos de los que la Tierra puede proporcionar o si, en la región de análisis, se está trabajando dentro de sus capacidades.

30. Estos factores de conversión, previamente establecidos y tomados de la literatura, indican cuánto espacio es necesario para producir un recurso o asimilar un desecho.

La anterior es una síntesis metodológica de la HE. Sin embargo, en las próximas secciones se revisan investigaciones sobre la HE en la agricultura y el sector cañero, con el fin de comprender mejor este caso de estudio. En adición, se explica detalladamente la metodología seleccionada y usada para realizar los cálculos propios de la HE del cultivo de caña de azúcar en la CARC.

3.2 La Huella Ecológica en la caña de azúcar

La HE es una herramienta cuantitativa que permite evaluar el impacto ambiental de las actividades humanas, al comparar la demanda de RRNN con la capacidad de carga del planeta para regenerarlos en términos de superficie o territorio (área). Empíricamente, y para el caso de la caña de azúcar, la HE puede proporcionar un marco de análisis para entender las presiones que este monocultivo ejerce sobre el ecosistema: dado que este es uno de los cultivos más importantes a nivel regional y nacional, este análisis se presenta como un caso de estudio relevante.

Así, esta breve revisión de literatura tiene como propósito identificar estudios aplicados de HE, específicamente, en la caña de azúcar para seleccionar una metodología de cálculo para este cultivo en la CARC. Como se mencionó con anterioridad, la HE está compuesta, por definición, por cinco sub-huellas que incluyen el cálculo de *superficies para cultivos, mar productivo, generación de energía, terreno urbanizado y absorción de dióxido de carbono*. Este desglose metodológico es importante para entender los distintos impactos que se ejercen sobre el entorno; sin embargo, debido en parte a esta complejidad, para el caso de la caña de azúcar se encuentra muy poca literatura sobre su cálculo completo: los análisis encontrados se relacionan con los cálculos individuales de la *Huella Hídrica* y la *Huella de Carbono*, pero no con documentos que integren en su totalidad los componentes de la HE.

Dada esta limitación, es necesario ampliar el alcance de esta revisión hacia otros contextos que, aunque no aborden directamente la HE en la caña de azúcar, pueden ofrecer bases útiles para extrapolar sus metodologías a nuestros cálculos. Por ejemplo, en el estudio de Agredo & Pérez-Rincón (2010) se utiliza una variación de la metodología de Wackernagel y Rees (1996) para calcular la HE en el campus universitario de la Universidad del Valle, en Cali, Colombia, partiendo del cálculo de la Huella de Carbono y estimando el número de hectáreas requeridas para absorber las emisiones de GEI asociadas a actividades de consumo de: i) energía eléctrica, ii) agua, iii) espacio construido, iv) movilidad, v) consumo de papel y vi) alimentación. Para llegar a la HE, los autores optan por realizar un balance de carbono, es decir, la diferencia entre las emisiones y las absorciones de GEI (*emisiones netas de GEI*) a partir de la capacidad de fijación del campus. Dentro de sus principales resultados, se destaca que aproximadamente se requieren de 7.693,7 ha de bosque para asimilar las emisiones de CO₂, lo que equivale a cerca de 77 veces la extensión ocupada por el Campus Universitario Meléndez (Cali). Si bien en este estudio no realiza el cálculo de la HE para el sector agrícola

como la caña de azúcar, sí proporciona pautas importantes para aplicar su metodología en este contexto.

A partir de este hallazgo, se amplió la revisión de literatura a estudios que analizan el *Balance de Carbono* en el cultivo de caña de azúcar. En particular, los estudios analizan la captura de carbono de una hectárea de caña de azúcar para Costa Rica, Colombia, Cuba y Brasil. En el documento de Ballester y Solera (2011), se examina la capacidad del cultivo de caña de azúcar para fijar carbono atmosférico en Costa Rica. Los autores exploran si este sector agrícola contribuye significativamente a la captura de carbono y, de ser así, cuantifican el carbono fijado. Destacan que existen prácticas agrícolas, como la quema durante la cosecha, que impactan negativamente el potencial de captura de carbono en los suelos, mostrando menores contenidos de carbono en comparación con suelos no quemados. Según sus estimaciones, la actividad cañera puede retirar aproximadamente 379 kg de CO₂ por hectárea anualmente.

Por su parte, González-Corzo (2015), analiza la evolución reciente de la agroindustria cañera en Cuba, incluyendo la participación de académicos tanto locales como internacionales. En el documento se presenta el cultivo de caña de azúcar como una alternativa económica para mitigar el efecto invernadero, al considerarlo como un sumidero de carbono. Aunque en el documento no se realiza el Balance de Carbono, sí se indica que en cálculos previos se ha «demostrado que una hectárea de caña elimina de la atmósfera 60t de dióxido de carbono, efecto similar al de un bosque de latitudes medias, aunque por el proceso tecnológico se emiten 18t, para un saldo neto de 42 toneladas» (González-Corzo, 2015; p.39). En el estudio de Aquino et. al (s.f.), sí se estima el balance entre las emisiones de CO₂eq generadas por la quema de caña de azúcar y el secuestro de estos gases por hectárea cultivada durante las zafas 2006/07 a 2015/16, en México. Utilizando factores de emisión específicos, se concluye que por cada tonelada de CO₂eq emitido a la atmósfera por la quema de una hectárea de caña de azúcar, el cultivo secuestra 23.5 ton. de CO₂eq.

Otros estudios sugieren que la retención de residuos de la caña en el suelo, en lugar de quemarlos, incrementa notablemente el contenido de carbono orgánico, mejorando así la fertilidad y el potencial de secuestro de carbono. Pradhan et al., (2023) analizan el potencial del cultivo de caña de azúcar en la India para mitigar el Cambio Climático, subrayando la importancia de la retención de residuos y la gestión de nutrientes en la acumulación de carbono orgánico en el suelo (SOC, por sus siglas en inglés). Los resultados mostraron que, en parcelas donde se retuvieron residuos, el SOC total aumentó en 21% comparado con parcelas donde se quemaron residuos, registrando 21,97 Mg C ha⁻¹, (equivalente a 21,97 toneladas por hectárea³¹) en la capa superficial del suelo (0-30 cm). Este hallazgo se refuerza con estudios previos realizados en Irán, donde Azizi et al. (2019)

[52]

31. La notación «Mg» se refiere a megagramos, y 1 megagramo (Mg) equivale a 1 tonelada (ton).

evaluaron el secuestro de carbono en la planta de caña de azúcar durante el año 2013-2014. Se realizaron análisis de SOC y se midió el carbono almacenado en las partes aéreas y subterráneas de la caña. Los resultados indicaron que el secuestro total de carbono fue de 3.934,5 kg ha⁻¹, equivalente a 14.439,6 kg ha⁻¹ de CO₂ atmosférico (equivalente a 14.4 toneladas de CO₂ por hectárea³²), sugiriendo que un cambio hacia un manejo de residuos sin quema podría optimizar la contribución del cultivo de caña a la reducción de emisiones.

Finalmente, Luca et al., (2018) destacan que la transición de la quema de caña de azúcar previa a la cosecha, hacia el manejo mecanizado de residuos ha incrementado significativamente el contenido de SOC en São Paulo, Brasil. No obstante, los autores advierten que, aunque este sistema potencia el secuestro de carbono, la labranza intermitente realizada cada 4-5 años para replantar limita el secuestro

de carbono en el suelo. Esto lo ilustran con un experimento que fue realizado a lo largo de 12 años y que mostró que un año después de replantar no se encontró carbono almacenado. Esto sugiere que el proceso de labranza elimina el carbono acumulado entre ciclos, afectando negativamente el potencial de secuestro de estos suelos. A partir de esta revisión, se anotó que los estudios suelen enfocarse en los efectos de la quema de caña, pero sin integrar la cantidad de combustibles utilizados para la producción de maquinaria, uso de esta, riego y fabricación de fertilizantes. Es decir, son estudios que no incorporan el análisis del ciclo de vida de la caña de azúcar. Parte de la síntesis de estos resultados se condensa en la Tabla 3.1

En resumen, esta revisión de literatura muestra una notable falta de estudios que aborden de manera integral la HE en el cultivo de caña de azúcar, lo que ha llevado a centrar la revisión en *balances de carbono*

Cantidad de CO2 absorbida	Unidad	Tipo ³³	Fuente	Nota
60	tonCO2/ha/año	Bruto	Ingenio San Carlos (Colombia)	«La caña tiene la particularidad de absorber dióxido de carbono. En media hectárea puede absorber más de 30t de CO2 y producir al mismo tiempo 21 toneladas de oxígeno puro» ¹
0,379	tonCO2/ha/año	Bruto	Ballesteró & Solera (2011) (Costa Rica)	«La actividad cañera en cada hectárea sembrada y cada año retira de la atmósfera aproximadamente 379 kg de CO2» ²
60	tonCO2/ha/año	Bruto	González-Corzo (2015). (Cuba)	«Los estudios realizados han demostrado que una hectárea de caña elimina de la atmósfera 60t de dióxido de carbono, efecto similar al de un bosque de latitudes medias, aunque por el proceso tecnológico se emiten 18t, para un saldo neto de 42 toneladas»
23,5	tonCO2/ha/año	Bruto	Aquino-Mercado, Cuevas-Alvarado & Carrillo-Arévalo (SF). (México)	«En el balance se estima que por cada tonelada de CO2eq emitido a la atmósfera por quema de una hectárea de caña de azúcar, la plantación de la misma superficie del cultivo secuestra 23.5 toneladas de este GEI»
21,97	tonCO2/ha/año	Bruto	Pradhan, A., et. al (2023)(India)	«El contenido total de carbono orgánico en el suelo (SOC) aumentó un 21% en parcelas con retención de residuos en comparación con las parcelas donde se quemaron los residuos (21.97Mg C ha ⁻¹)»
14,4	tonCO2/ha/año	Bruto	Azizi, A., et. al. (2019). (Irán)	«En otras palabras, los sistemas de plantas y suelos en los terrenos de caña de azúcar fueron capaces de secuestrar 14.439,6 kg ha ⁻¹ de CO2 atmosférico por año»
18.75 ³	tonCO2/ha/año	Bruto	Luca E. F, et. al. (2018). (Brasil)	«Las proporciones resultantes de SOCc/SONc no variaron mucho con la profundidad del suelo en ambos tratamientos en todos los sitios, y variaron de 17.7 a 19.8 y de 16.2 a 17.5 para B (quema de residuos) y GT (gestión de residuos verdes), respectivamente».

Tabla 3.1 Revisión de factores de absorción de CO2 por una hectárea de caña de azúcar
Fuente: elaboración propia

Nota: Los estudios se enfocan en calcular la cantidad de CO2 absorbido a partir de dos componentes: primero, las partes de la planta de caña como raíces, tallos, hojas y segundo, contabilizando el contenido implícito de carbono en el suelo. En ésta última sección suelen enfocarse en las prácticas agrícolas y discutir diferencias entre la absorción de carbono en terrenos donde se practica la quema respecto a terrenos donde no se hace. 1. Ingenio San Carlos // 2. Infoagro // 3. Este es el resultado de promediar los rangos de 17.7 y 19.8.

32. La notación «Kg» se refiere a kilogramos, y 1 kilogramo (kg) equivale a 1 tonelada (ton).
33. En la mayoría de los estudios se realiza el cálculo de las absorciones de CO2 a partir de la capacidad de absorción de la planta de caña de azúcar y del carbono contenido en el suelo. Adicionalmente, no se realiza la diferencia entre estas y un cálculo de emisiones de GEI del cultivo de caña en la zona de estudio. En consecuencia, al no observarse este cálculo, los valores tomados corresponden a la absorción bruta anual de CO2, en toneladas, por cada hectárea sembrada del cultivo.

como alternativa metodológica. En este caso, la literatura sugiere al cultivo de caña de azúcar como potencial fijador/capturador de carbono, especialmente cuando se aplican prácticas de manejo sin quema. Sin embargo, algunos hallazgos sugieren que, aunque ciertas prácticas mejoran el secuestro de carbono, la labranza intermitente limita su efectividad. Estas dinámicas muestran la necesidad de desarrollar más estudios integrales sobre HE que contribuyan con el entendimiento de las presiones ambientales asociadas. Al tiempo, en los estudios revisados se observa que casi todos incluyen como generadores de carbono únicamente a la quema de la caña, pero no se consideran otros factores generadores de GEI como el uso de energía fósil en la fabricación y funcionamiento de la maquinaria y equipo o la energía utilizada para la producción de abonos, herbicidas y sistemas de riego.

3.3 Cálculo de la Huella Ecológica en la CARC (1960-2022)

Esta sección presenta una aproximación metodológica al cálculo de la HE del cultivo de caña de azúcar en la CARC, en el período 1960-2022. La pregunta que guía este cálculo surge a partir de los hallazgos encontrados en la literatura, donde se afirma que la capacidad de absorción de carbono de la caña es altísima y comparable con bosques de latitudes medias (González-Corzo, 2015; p.39). En ese sentido, cobra relevancia el interrogante sobre *¿cuántas hectáreas de bosque primario, bosque intermedio y de cultivo de caña son requeridas para absorber las emisiones de GEI generadas por el cultivo de caña de azúcar en la CARC?* Este análisis diferencial se realiza debido a que la capacidad de captura de carbono varía dependiendo del tipo de uso del suelo que se dé. La estimación se basa en la metodología de Wackernagel & Rees (1996), pero adaptada a las necesidades del estudio siguiendo a Agredo & Pérez-Rincón (2010), quienes estimaron el área aproximada que es requerida para absorber los GEI emitidos en un campus universitario³⁴.

Utilizar este marco de referencia permite expresar la Huella

Ecológica del cultivo de caña de azúcar como el territorio (área) requerido para absorber los GEI estimados en la Huella de Carbono Neta (HCN). A su vez, la HCN se obtiene al restar las emisiones totales de GEI (esto es, la Huella de Carbono del cultivo), con la cantidad de GEI que la misma plantación es capaz de capturar (Secuestro o Absorción de Carbono).

Para calcular la HE se siguieron cuatro pasos fundamentales que se desagregan en la Metodología: i) se partió de los resultados del capítulo anterior, la *Huella de Carbono* (HC), que otorgó la serie de tiempo de GEI emitidos por el cultivo de caña de azúcar en la CARC; ii) con la información de las hectáreas de caña de azúcar sembradas y los factores de absorción de GEI revisados en la literatura, se calculó el *Secuestro de Carbono*; iii) posteriormente, se realizó la diferencia entre la HC y el Secuestro de Carbono para obtener la HCN (o emisión neta de CO₂) y iv) finalmente, se calculó la Huella Ecológica de la caña de azúcar en términos del área (en hectáreas) de bosque primario, bosque intermedio y de cultivo de caña necesaria para absorber la HCN.

3.3.1 Metodología

Para realizar el cálculo de la Huella Ecológica del cultivo de caña de azúcar en la CARC se siguieron los pasos sintetizados en la Figura 3.2.

3.3.1.1 Huella de Carbono

Para estimar la cantidad de GEI emitidos por el cultivo de caña de azúcar en la CARC, se retoman los resultados obtenidos previamente en la sección 2.4 Cálculo de la Huella de Carbono del cultivo de la caña de azúcar en la CARC

Es importante recordar que, para realizar este cálculo, se usó la misma base de datos construida para estimar el modelo econométrico. Adicionalmente, se recuerda que el cálculo de la HC incluyó: i) el combustible empleado en la maquinaria agrícola, ii) la aplicación de fertilizantes nitrogenados, iii) las emisiones de óxido nitroso (N₂O) derivadas de la volatilización de dichos fertilizantes (estimadas

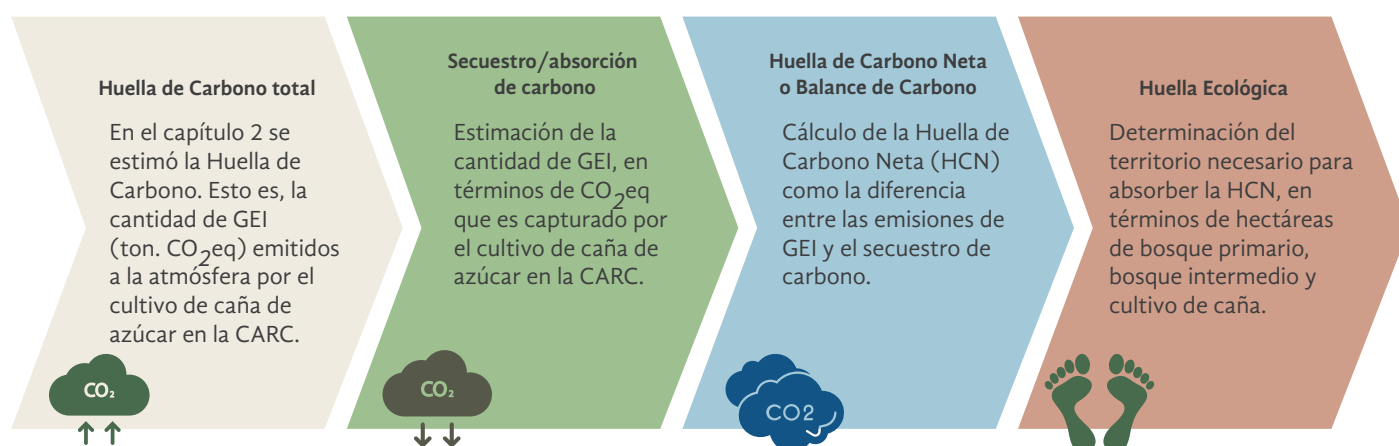


Figura 3. 2. Síntesis metodológica del cálculo de la Huella Ecológica del cultivo de caña de azúcar en la CARC

Fuente: elaboración propia

[54]

34. En términos de hectáreas. Investigación realizada para la Universidad del Valle, en Cali, Colombia.

como el 1% del nitrógeno aplicado, conforme a las directrices del IPCC, 2006) y iv) la quema de caña durante la cosecha. Para mayor explicación de esta sección, dirigirse al apartado de Metodología del capítulo anterior.

3.3.1.2 Secuestro o absorción de carbono

Para estimar la cantidad de GEI que son capturados por el cultivo de caña, es decir, el cálculo del Secuestro de Carbono se utiliza la Ecuación 3.2:

Ecuación 3.2 Secuestro de Carbono de la caña de azúcar

$$Abs_{CO2eq_t} = \left(\sum ha_t \times FA_t \right)$$

Donde:

- AbsCO_{2eq}) son las absorciones de GEI (ton. CO_{2eq}) en el año t.
- ha es la cantidad de hectáreas de caña de azúcar sembradas en el año t.
- FA es el factor de absorción de GEI del cultivo de caña de azúcar.

Para definir el factor de absorción de GEI (tonCO2/ha/año) se parte de la información obtenida en la literatura (véase Tabla 3.1). Se decidió trabajar con los valores límite (mín-máx) encontrados en las investigaciones y, por ende, se obtuvieron dos series de tiempo del Secuestro de Carbono: i) utilizando el valor mínimo de absorciones de GEI para una hectárea de caña, definido por Ballestero & Solera (2011) y ii) utilizando el valor máximo de absorciones de GEI para una hectárea de caña, definido por González-Corzo, (2015). Estos factores se resumen en la Tabla 3.2.

En síntesis, el producto del total de las hectáreas de caña sembradas en cada año de análisis por el factor de absorción (constante a lo largo del tiempo), otorga la serie de tiempo del Secuestro de Carbono. Véase Anexo 1 Secuestro de Carbono.

3.3.1.3 Huella de Carbono Neta (HCN) o Balance de Carbono

Posteriormente, para encontrar las Huella de Carbono Neta es necesario hacer el Balance de Carbono. Estos datos se obtienen al hacer la diferencia entre los resultados de la Huella de Carbono (HC) obtenida previamente (Capítulo 2 de este documento) y los resultados del Secuestro de Carbono, obtenidos en esta sección. Se utiliza la siguiente Ecuación 3.3

Ecuación 3.3. Huella de Carbono Neta o Balance de Carbono de la caña de azúcar

$$HCN_t = \left(\sum HC_t - Abs_{CO2eq_t} \right)$$

Donde,

- HCN_t son las emisiones netas de GEI (ton. CO_{2eq}) en el año t.
- HC_t es la Huella de Carbono o emisiones brutas de GEI (ton. CO_{2eq}) en el año t.
- Abs_{CO2eq} son las absorciones de GEI (ton. CO_{2eq}) en el año t.
- Este balance proporciona la cantidad de GEI que es emitido a la atmósfera, de forma neta, para cada año de la serie.

3.3.1.4 Huella Ecológica del cultivo de caña de azúcar en la CARC

Finalmente, a partir del balance de emisiones de carbono, es decir, de la Huella de Carbono Neta, se calcula el territorio necesario para absorber estos GEI utilizando la Ecuación 3.4:

Ecuación 3.4 Huella Ecológica de la caña de azúcar

$$HE_t = \frac{HCN_t}{FA_t}$$

Donde:

- HE_t es la cantidad de hectáreas necesarias para absorber las emisiones netas (o HCN) de GEI (ton. CO_{2eq}) en el año t.
- HCN_t son las emisiones netas de GEI (ton. CO_{2eq}) en el año t.
- FA es el factor de absorción de GEI por tipo de suelo i.

Para definir los factores de absorción de la HCN se decidió utilizar tres tipos de sumideros de carbono³⁵: bosque primario, bosque intermedio y

Factor de absorción	Unidad	Fuente	Nota
0,379	tonCO2/ha/año	Ballestero & Solera (2011) (Costa Rica)	«La actividad cañera en cada hectárea sembrada y cada año retira de la atmósfera aproximadamente 379kg de CO2»
42	tonCO2/ha/año	1Ingenio San Carlos (Colombia).	«La caña tiene la particularidad de absorber dióxido de carbono. En media hectárea puede absorber más de 30t de CO2 y producir al mismo tiempo 21 toneladas de oxígeno puro»1
		González-Corzo, (2015) (Cuba).	«Estudios (...) han demostrado que una ha de caña elimina de la atmósfera 60t de CO2, efecto similar al de un bosque de latitudes medias, aunque por el proceso tecnológico se emiten 18t, para un saldo neto de 42 toneladas»2

Tabla 3.2 Factores de absorción de CO2 utilizados en el secuestro de carbono
Fuente: elaboración propia

35. «El equilibrio del carbono en la tierra es función de tres reservorios, el océano con una cantidad estimada de carbono de 38.000 Pg (un Pg es igual a 1015g o 1.000 millones de toneladas métricas), la atmósfera contendría 750 Pg, y el sistema terrestre aportaría 550 Pg como biomasa-vegetación y 1.550 Pg de carbono orgánico del suelo» (Estrada et al., 2003).

Tipo de terreno/suelo	Cantidad de CO ₂ eq absorbida	Unidad	Fuente
Caña de azúcar	0,379	tonCO ₂ /ha/año	Ballester & Solera (2011)
Bosque primario ³⁶	60	tonCO ₂ /ha/año	Brown & Lugo (1992); Brown et. al (1989)
Bosque intermedio ³⁷	25	tonCO ₂ /ha/año	Brown & Lugo (1992); Brown et. al (1989) en Kanninen, M. (s.f.).

Tabla 3.3 Factores de absorción de CO₂ utilizados

Fuente: elaboración propia

cultivo de caña. Este cálculo permitió determinar las hectáreas requeridas, por cada tipo de territorio, para absorber los GEI netos emitidos por el cultivo de caña en la CARC. Esto es, la Huella Ecológica. Los factores utilizados se condensan en la Tabla 3.3.

Con la información anterior es posible realizar el cálculo de la HE, obteniendo el cociente entre la HCN y el factor de absorción utilizado por tipo de suelo.

3.4 Resultados³⁸

• Huella de Carbono

Es relevante señalar que, como se mencionó en la sección de resultados del Capítulo 2, el cálculo de la Huella de Carbono (HC) tiene limitaciones que resultan en una subestimación de este indicador. La exclusión de factores como el uso de herbicidas y fungicidas, el bombeo de agua para riego, la energía utilizada en la fabricación de maquinaria agrícola y el combustible empleado para transportar la caña de azúcar a los ingenios donde es procesada, es resultado de la poca disponibilidad de información relacionada. Este escenario, en primer lugar, limita la capacidad y la precisión del análisis respecto a las presiones que está

ejerciendo el cultivo de caña de azúcar en términos de emisiones de GEI.

En ese sentido y, en segundo lugar, esta subestimación tiene implicaciones en los resultados de la Huella Ecológica (HE), dado que esta depende directamente de los resultados de la HC. La subestimación de la HC hace que los resultados muestren emisiones de GEI menores al valor que correspondería en caso de contabilizarse los factores excluidos, y esto a su vez genera una disminución en los resultados del área de tierra necesaria para absorber el carbono emitido. Por tanto, los resultados de la Huella Ecológica también presentan una subestimación y pueden no capturar la magnitud del impacto ambiental asociado.

• Secuestro de Carbono del cultivo de caña de azúcar en la CARC

A partir de la Ecuación 3.2 y, utilizando el área cultivada con caña de azúcar en cada año de análisis (1960-2022), se generaron dos series de tiempo de absorción de GEI para el cultivo cañero en la CARC. Los resultados se muestran en la siguiente Figura y los llamaremos escenario 1 y escenario 2.

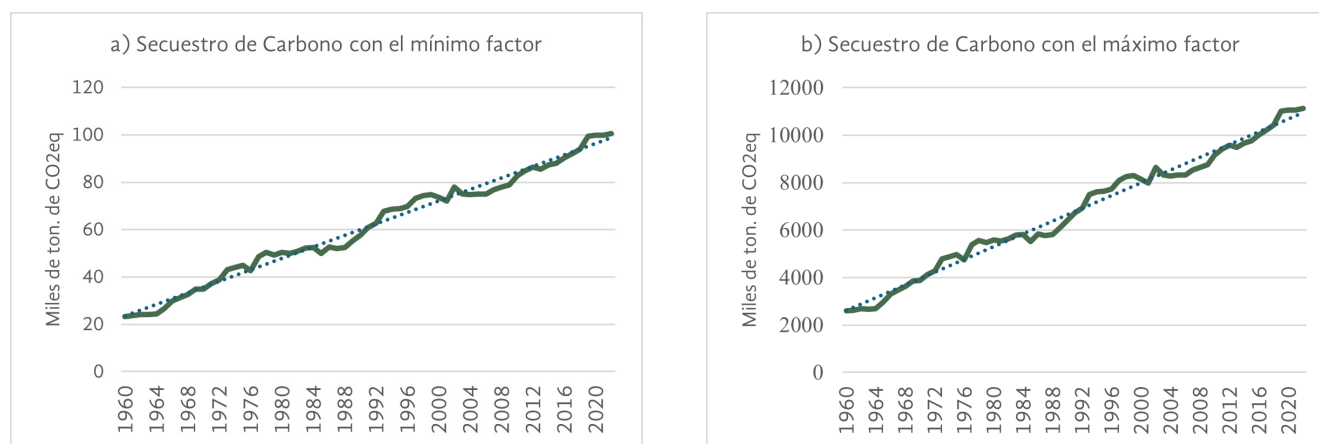


Figura 3.3 Resultado del cálculo de Secuestro de Carbono utilizando el factor de absorción mínimo y máximo según la literatura.

Fuente: elaboración propia

- a) Escenario 1: Serie de tiempo de absorción de GEI del cultivo cañero en la CARC. Se utilizó el factor mínimo de Ballester & Solera (2011).
b) Escenario 2: Serie de tiempo de absorción de GEI del cultivo cañero en la CARC. Se utilizó el factor máximo de González-Corzo (2015)..

36. Según la FAO los bosques primarios son «bosques de especies nativas en los que no existen indicaciones claramente visibles de actividades humanas y los procesos ecológicos no han sido alterados de forma significativa» (FAO, 2010. P. 17). El valor de referencia obtenido es para un *bosque seco primario*.

37. Un bosque intermedio o bosque secundario es aquel que ha sufrido perturbaciones significativas, ya sea por actividades humanas como la tala o la agricultura, o por eventos naturales. Estos bosques están en proceso de regeneración y pueden no tener la misma biodiversidad ni capacidad de almacenamiento de carbono que los bosques primarios. Como se define en Smith et. al (1997), el bosque secundario es una «vegetación leñosa de carácter sucesional que se desarrolla sobre tierras cuya vegetación original fue destruida por actividades humanas». El valor de referencia obtenido es para un *bosque seco secundario*.

38. Las bases de datos de estos resultados se pueden ver en el Anexo 4. *Huella Ecológica*.

Dado que los resultados del Secuestro de Carbono dependen directamente de las hectáreas sembradas, se observa un comportamiento creciente que sigue su misma tendencia. La Figura muestra los dos escenarios de absorción de GEI, el primero (a) se basa en el factor de absorción mínimo de 0.379 tonCO₂/ha/año de Ballesteros & Solera (2011) y el segundo (b) en el valor máximo de absorción de 42 tonCO₂/ha/año de González-Corzo (2015).

Se observa, a grandes rasgos, una absorción inicial de 23,3 mil ton.CO₂eq en 1960 para el escenario 1, que finaliza en 100,5 mil ton.CO₂eq absorbidas en 2022, reflejando un incremento estable pero moderado a lo largo de las décadas. En el caso del escenario 2, los valores de absorción de GEI inician en 2.587,2 miles de ton.CO₂eq en 1960 hasta llegar a los 1,1 millones de ton eq en 2022, mostrando una expansión mucho más significativa. Para ambos casos, la tasa de crecimiento geométrica del secuestro de carbono en la caña de azúcar entre el primer y el último año del análisis (1960-2022) es del 2,38%. La tendencia creciente de las absorciones de carbono es impulsada de forma directa por la expansión del área cultivada.

Ahora bien, la notable discrepancia entre los datos absolutos de los dos escenarios de absorción de GEI se relaciona con la diferencia en los factores de absorción considerados. El *escenario 1* refleja una absorción moderada de carbono, mientras que el *escenario 2* presenta un potencial significativamente mayor. Sin embargo, es importante destacar que ambos escenarios asumen factores de absorción *constantes* a lo largo del año, sin considerar las variaciones que podrían generarse por las diferentes fases de crecimiento de la planta. Este enfoque uniforme podría simplificar en exceso la dinámica del secuestro de carbono, dado que se discute si la capacidad de absorción varía según la etapa fenológica del cultivo y las condiciones específicas de las prácticas y del ambiente.

• Huella de Carbono Neta (HCN)

Para obtener la Huella de Carbono Neta, se aplicó la Ecuación 3.3: restandole a la Huella de Carbono (obtenida en el Capítulo 2) los resultados del Secuestro de Carbono de la sección anterior. Dado que en el cálculo del Secuestro se generaron dos series de absorción de GEI, también fueron calculadas dos HCN con los valores máximos y mínimos utilizados previamente. A estos resultados los llamamos *escenario 1* y *escenario 2* y se muestran en la Figura 3.4.

Ahora, al analizar los resultados de la HCN en función de los factores de absorción establecidos, se observa una gran diferencia en las tendencias de ambas huellas. En el *escenario 1* el primer año de análisis presenta una HCN negativa que crece paulatinamente hasta volverse positiva. Así, pasa de -6.8 mil ton. CO₂eq en 1960 hasta 47.5 mil ton. CO₂eq en 2003, siendo este su punto máximo, para luego descender hasta 5.6 mil ton. CO₂eq en 2022. Este descenso en está relacionado con el quiebre en las hectáreas quemadas de caña que disminuye radicalmente los GEI generados a partir de 2003 (ver Figura 2.2).

En contraste, al utilizar el factor de absorción máximo, en el *escenario 2* se encuentra una HCN cada vez más negativa (véase sección b,

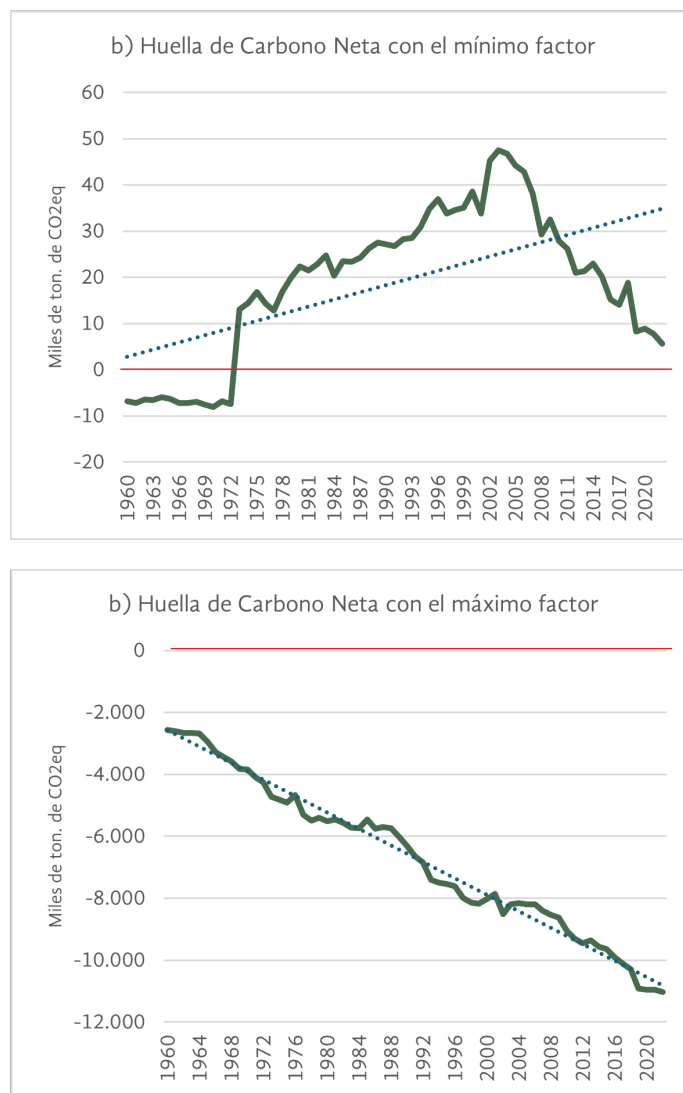


Figura 3. 4 Resultado de la Huella de Carbono Neta (HCN) utilizando el factor de absorción mínimo y máximo según la literatura

Fuente: cálculos propios

a) Escenario 1: Serie de tiempo de la HCN del cultivo cañero en la CARC. Se utilizó el factor mínimo de Ballesteros & Solera (2011).

b) Escenario 2: Serie de tiempo de la HCN del cultivo cañero en la CARC. Se utilizó el factor máximo de González-Corzo (2015).

de la Figura 3.4). Iniciando con -2,5 millones de ton. CO₂eq reportadas para el primer año, concluye en 2022 con una HCN de -11 millones de ton. CO₂eq. Esto es, una HCN negativa implica que en esos años el secuestro de carbono fue mayor que las emisiones y, en ese sentido, el cultivo de caña de azúcar está capturando carbono en forma creciente y contribuyendo, en forma contraria al imaginario común, con el enfriamiento del planeta. Estos resultados sugieren que el cultivo de caña no sólo elimina todas sus emisiones de CO₂, sino que actúa como un sumidero de carbono con capacidades de absorción similares a un bosque secundario. Esto podría interpretarse como una contribución climática, sin embargo, desde un enfoque de EE resulta esencial contextualizar este análisis. Aunque la caña pueda compensar sus propias emisiones, su expansión genera fuertes presiones ambientales sobre el suelo o el agua que no deben ignorarse.

Bajo los contextos anteriores, se infiere que la única posibilidad de calcular una Huella Ecológica en términos del territorio necesario para absorber las emisiones netas de GEI (o HCN), es cuando estas sean positivas. En contraposición, dado que los cálculos con el factor de absorción máximo (*escenario 2*) generan una HCN negativa, no es posible calcular una HE, pues su resultado será igualmente negativo. Es decir, en este panorama *no habría GEI por absorber* y, por extensión, tampoco habría Huella Ecológica. Por esta razón, se decidió prescindir del cálculo de una HE con estos datos y deliberar únicamente sobre los resultados de la HE positiva, calculada a partir del factor de absorción mínimo (*escenario 1*).

• Huella Ecológica del Cultivo de Caña de Azúcar en la CARC

En este contexto, la Huella Ecológica es definida como la cantidad de territorio necesario (en hectáreas) para absorber la Huella de Carbono Neta del cultivo de caña de azúcar en la CARC. A partir de los resultados anteriores, la Huella Ecológica (Ecuación 3.4) fue calculada sólo para el escenario 1, considerando tres tipos de territorios que, según la literatura, pueden actuar como sumideros de carbono: el bosque primario, el bosque intermedio y el cultivo de caña de azúcar. Los resultados pueden observarse en la Figura 3.5.

Esta Figura muestra el territorio necesario (hectáreas) para absorber la Huella de Carbono Neta (HCN) calculada a partir del mínimo factor de absorción (*escenario 1*). Detalle de los datos respectivos se pueden ver en el Anexo 3. Se observan diferencias significativas entre la superficie requerida del bosque primario, bosque intermedio, y del cultivo de caña de azúcar: el bosque primario inicia requiriendo una cantidad negativa de -113,5 ha en los primeros años. A pesar de

ello, el área va aumentando progresivamente hasta alcanzar un punto máximo de 792,5 ha en 2004. Comparado con el bosque intermedio y el cultivo de caña, el bosque primario requiere la menor extensión de hectáreas para absorber la HCN, con una diferencia considerable. En el último año, el bosque primario necesitó aproximadamente 94 ha para absorber la HCN, mientras que el bosque intermedio demandó más del doble de este valor, con 225,6 ha. El cultivo de caña, por su parte, requirió casi 160 veces más superficie para absorber este carbono. La Tabla 3.4 muestra información en términos absolutos de los resultados del cálculo de la Huella Ecológica en el primer y último año de análisis.

La anterior Tabla 3.4 sintetiza los resultados del cálculo de la Huella Ecológica (HE) para tres tipos de territorio: bosque primario, bosque intermedio y cultivo de caña de azúcar, considerando los años 1960 y 2022. Se observa la siguiente evolución:

- **Bosque primario:** La HE para 2022 requeriría un total de 94 ha, lo cual equivale más o menos al campus universitario de Melendez de la Universidad del Valle en Cali. En términos de incremento absoluto lo hizo en 207,5 hectáreas entre 1960 y 2022. Y en términos acumulados, se requerirían para absorber el carbono a lo largo de los 62 años analizados un total cercano a las 20 mil ha, que equivalen a un terreno un poco más grande que el municipio de Caicedonia.

- **Bosque intermedio:** Para 2022 se requerirían 226 hectáreas de bosque secundario para absorber el carbón generado, siendo esa la HE. Este tipo de cobertura mostró un crecimiento absoluto más elevado, de 498,1 hectáreas entre el primer y el último año de análisis. El total acumulado fue de 47 mil hectáreas, esto significa que para absorber todo el carbono generado en el periodo

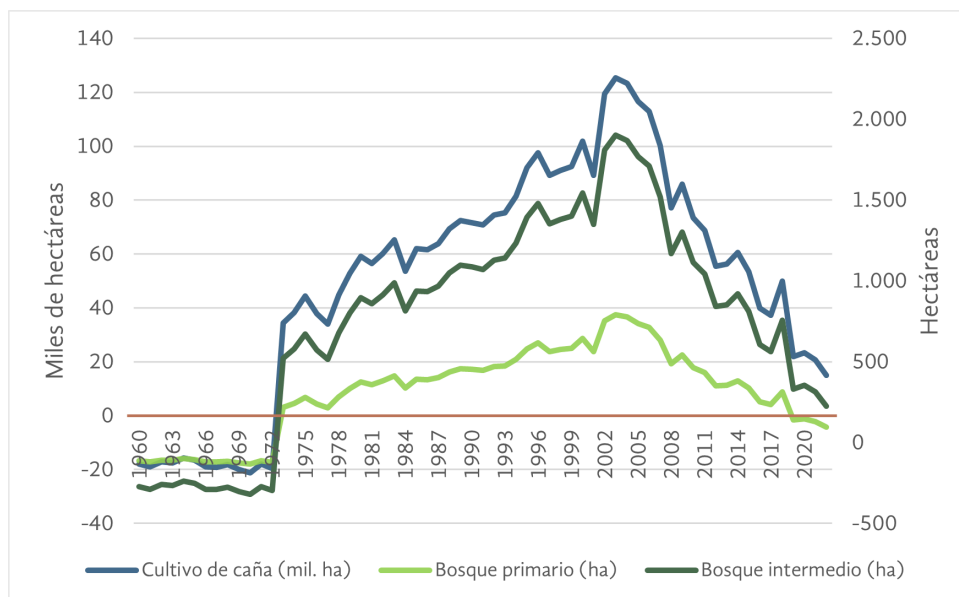


Figura 3. 5 Huella Ecológica o territorio necesario para absorber la HCN

Fuente: elaboración y cálculos propios

a) Escenario 1: Serie de tiempo de la HCN del cultivo cañero en la CARC
Se utilizó el factor mínimo de Ballesteros & Solera (2011)

b) Escenario 2: Serie de tiempo de la HCN del cultivo cañero en la CARC
Se utilizó el factor máximo de González-Corzo (2015)

Huella Ecológica	1960	2022	Crecimiento absoluto (ha)	Total Huella acumulada (ha) (1960-2022)
Bosque primario (ha)	- 113,5	94	207,5	19.797,5
Bosque intermedio (ha)	- 272,5	225,6	498,1	47.514,1
Caña de azúcar (ha)	-17.973,5	14.882,7	32.856,2	3.134.173,4

Tabla 3.4 Síntesis de resultados de la Huella Ecológica para cada tipo de territorio: bosque primario, secundario y caña de azúcar
 Fuente: elaboración propia

• **Caña de azúcar:** Para 2022, este cultivo requiere un total cercano a 15 mil ha para absorber el carbono generado (equivale a Sabaneta, Antioquia). En términos de dinámica fue el que más creció en términos absolutos, con un incremento de 32.8 mil hectáreas entre 1960 y 2022, lo que resultó en una huella acumulada de más de tres millones de hectáreas. Con esta dinámica, el cultivo de caña de azúcar necesita una superficie alta para compensar las emisiones de carbono, significando un área similar a la del departamento de Santander. Sus requerimientos en superficie son 150 veces más que la requerida por el bosque primario y 66 veces la del bosque intermedio para el mismo propósito de absorción de carbono.

La Figura 3.6 ilustra la evolución de estos resultados en dos momentos clave del análisis: 1973 y 2022. Esta Figura incluye la información desde 1973, porque a partir de este año todos los resultados de HE son positivos. Se ilustra la cantidad de territorio necesario para absorber la HCN de los años 1973 y 2022 en los tres tipos de ecosistemas analizados. Los resultados muestran que en 1973, se requerían 217,1 hectáreas de bosque primario; 521,1 hectáreas de bosque intermedio y 34.372,2 hectáreas de cultivo de caña de azúcar para compensar las emisiones netas de carbono generadas, cifras muy diferentes a las cantidades negativas resultantes en el primero año de análisis (1960). Esta dinámica indica que en 1973 ya se había

superado el umbral de HE negativa, y las emisiones comenzaron a generar una necesidad de compensación. En contraste, al comparar la HE de 1973 con la del 2022 (último año de análisis) se observa una disminución en el territorio requerido para absorber las emisiones de carbono en todos los casos analizados.

3.5 Conclusiones y discusión

Los estudios previos sobre la agroindustria de la caña de azúcar han ofrecido una visión parcial del panorama de emisiones al centrarse en las emisiones de GEI sin considerar el balance global del carbono. Este análisis muestra que es esencial incluir tanto las emisiones como el potencial de captura de CO_{2eq} para comprender el verdadero impacto ambiental en términos de carbono y HE de la caña de azúcar en la CARC.

Una de las cuestiones discutidas al momento de realizar el cálculo de esta HE fue la capacidad de las plantaciones de caña para actuar como sumideros de carbono. Según autores como Luca et al. (2018), esta capacidad es temporal y limitada, debido a su ciclo de cosecha anual y a las prácticas de quema asociadas. Esto indica que, aunque haya un aumento en la absorción de CO_{2eq}, su efectividad es cuestionable a largo plazo. Por ello, una de las limitaciones al momento de hacer este cálculo fue no tener información de la captura de carbono a lo largo del ciclo de cultivo de caña de azúcar. Esto, porque la absorción de CO₂ en un ciclo de cultivo puede variar dependiendo de la etapa

[59]

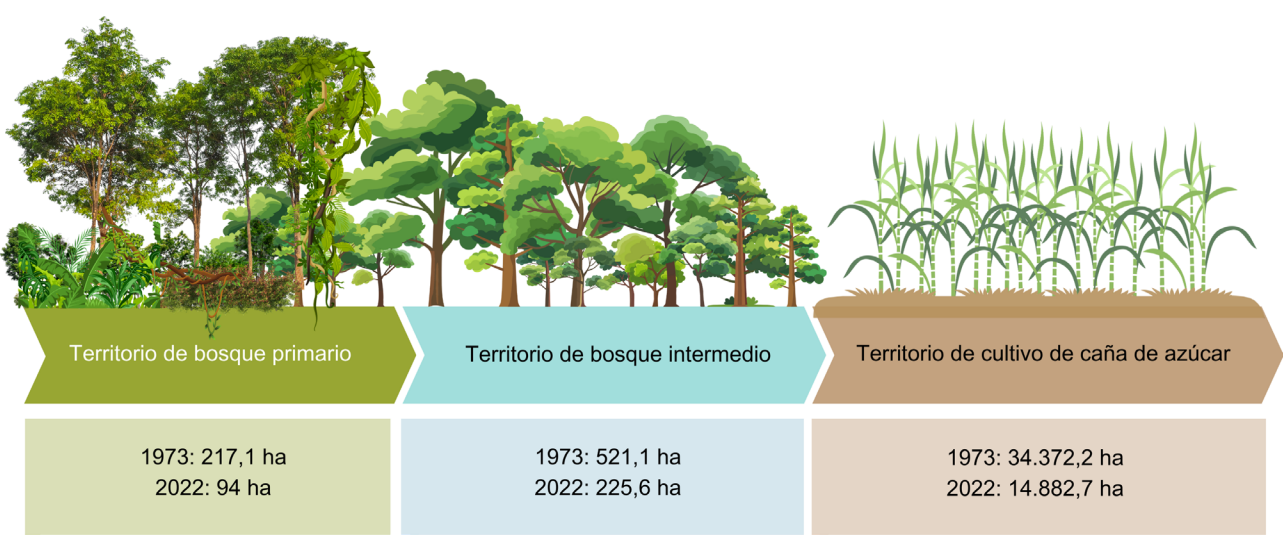


Figura 3.6 Síntesis de resultados de la Huella Ecológica en dos años de análisis por tipo de territorio
 Fuente: elaboración y cálculos propios

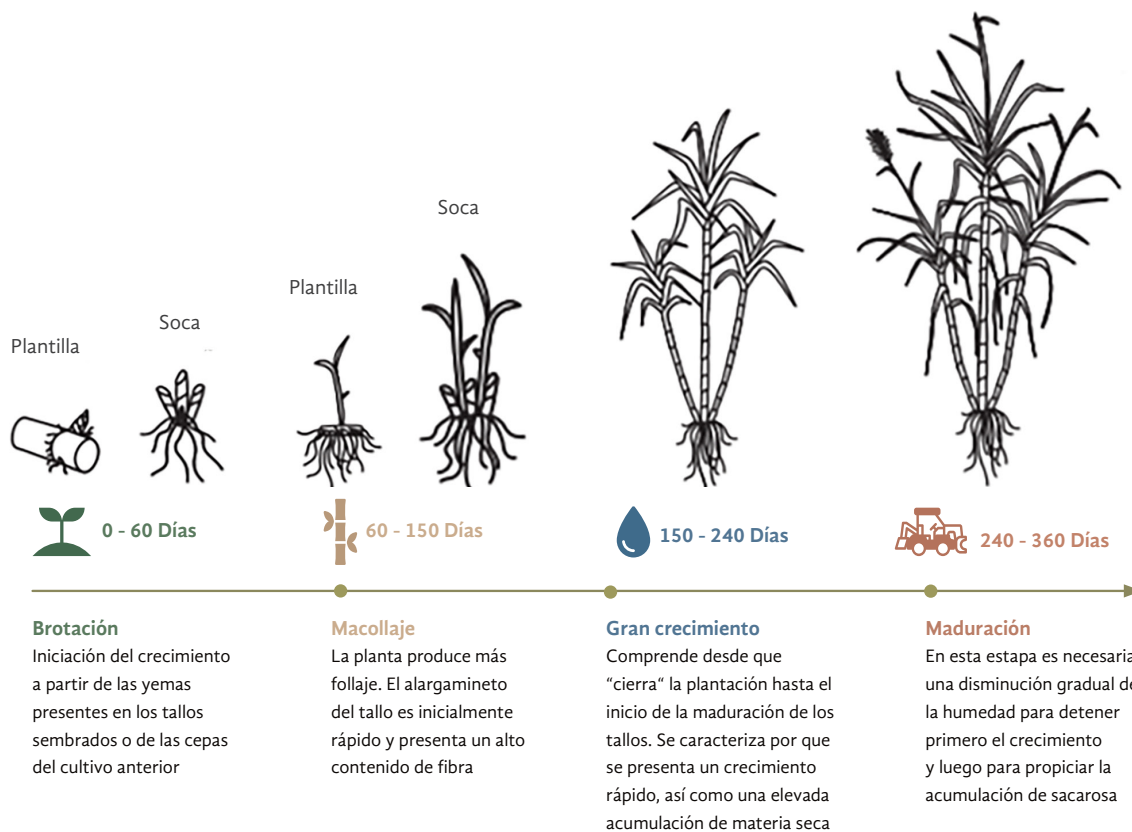


Figura 3.7. Etapas fenológicas del cultivo de caña de azúcar
Fuente: Fuente: tomado del Volumen N° 2 de esta investigación

[60] de crecimiento en que se encuentre la planta, ya sea en su fase de germinación, macollaje, gran crecimiento o madurez (véase Figura 3.7).

Esta variabilidad no ha sido suficientemente abordada en la literatura existente, lo que limita la precisión de los cálculos sobre el potencial de captura de carbono y plantea un vacío en la investigación actual. Por ello, determinar la absorción de CO_2 en cada etapa del crecimiento vegetal es esencial para obtener estimaciones más rigurosas sobre la capacidad de la caña de azúcar para actuar como sumidero de carbono. Una evaluación detallada permitiría mejorar la veracidad de los cálculos de la HE y del Balance de Carbono. En forma contraria, el bosque primario y secundario son sistemas ecológicos complejos con espesuras vegetales significativas, diferentes pisos de flora incluyendo no solo árboles y arbustos, sino también vegetación como la hierba, las flores y hasta por las deposiciones orgánicas de estas plantas en el suelo, como las ramas o las hojas caídas, que contribuyen a la riqueza del suelo. Estas comunidades de plantas cubren grandes áreas de la Tierra y constituyen hábitats para los animales, son moduladores de flujos hidrológicos y conservadores del suelo, constituyendo uno de los aspectos más relevantes de la biosfera del globo terráqueo. Igualmente, son ecosistemas no temporales sino estables, que pueden tener muchos de ellos entre decenas y centenas de años, con lo cual generan gran cantidad de servicios ecosistémicos dentro de los que está la captura de carbono.

Por ello, presentar al cultivo de caña de azúcar como un sumidero de carbono, a partir de factores de absorción altos, oculta las importantes

presiones ambientales que su expansión genera en ecosistemas diversos, especialmente en regiones de alto valor ecológico. Desde la EE, que prioriza los límites biofísicos y la sostenibilidad fuerte, resulta importante cuestionar este enfoque. Aunque los datos sugieren que el cultivo puede absorber más CO_2 del que emite, este saldo de carbono no abarca las complejas externalidades o pasivos ambientales: la caña de azúcar desplaza ecosistemas naturales, reduce la biodiversidad y compromete la funcionalidad de suelos y cuerpos de agua. Además, al ocupar grandes extensiones de terreno fértil, impide el desarrollo de otros usos del suelo que podrían equilibrar las necesidades de absorción de carbono, como la producción de alimentos que garantizan la soberanía alimentaria.

Este monocultivo limita la capacidad de las comunidades locales para decidir sobre sus sistemas alimentarios, ya que prioriza cultivos industriales sobre aquellos destinados al consumo humano, lo que genera dependencia del mercado global y afecta la seguridad alimentaria. Otra cuestión importante es que este enfoque de absorción de carbono podría incentivar la expansión de monocultivos en detrimento de paisajes multifuncionales, bajo la premisa de que pueden actuar como sumideros de carbono, ignorando los impactos negativos en la autosuficiencia alimentaria y la resiliencia de los ecosistemas. Se destaca, finalmente, que una verdadera contribución a la mitigación climática no puede sostenerse en sistemas agrícolas intensivos y ambientalmente degradantes, sino que debería orientarse a prácticas regenerativas que no solo capten CO_2 , sino que respeten y restauren la integridad ecosistémica.

3.6 Referencias

- Aquino-Mercado, P. R., Cuevas-Alvarado, C. M., & Carrillo-Arévalo, K. N. (SF).** *Balance de las emisiones de gases y partículas de la quema de caña de azúcar en México*. CONADESUCA-SAGARPA. Recuperado de <https://siiba.conadesuca.gob.mx/siiaa/Consulta/verDoc.aspx?num=998>
- Azizi, A., Ghanbarian, G., Hassanli, A., & Shomeili, M. (2019).** Carbon sequestration in sugarcane plant and soil with different cultivation systems. *International Agricultural Research*, 38(2), 47-54. <https://doi.org/10.22099/iar.2019.30598.1295>
- Ballester, J. M., & Solera, M. C. (2011).** Contribución del Sector Cañero a la Mitigación del Cambio Climático. In XVIII Congreso Azucarero Nacional (ATACORI) (p. 14). Recuperado de https://www.infoagro.go.cr/Documents/Contribucion_Sector_Canero_a_la_Mitigacion_del_Cambio_Climatico.pdf
- Brown, S. & Lugo, A. (1992).** Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia* 17.
- Brown, S.; Gillespie, A.J.R. & Lugo, A.E. (1989).** Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35. Recuperado de <https://n9.cl/mps6av>
- Estrada, M. S., Lau, N. S., Venegas, E. Z., Flores, M. M., & Montano, J. J. (2003).** El secuestro de carbono en la agricultura y su importancia con el calentamiento global. *The Carbon Sequestration in Agriculture and its Importance in Global Warming. Theoria*, 12(1), 65-71. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/299/29901206.pdf>
- Global Footprint Network. (2020).** National Footprint and Biocapacity Accounts, 2020 Edition. Global Footprint Network.
- González-Corzo, M. (Ed.). (2015).** La agroindustria cañera cubana: transformaciones recientes. Bildner Center. Recuperado de <https://cubaproject.org/wp-content/uploads/2014/07/SugarEbook.pdf>
- Ingenio San Carlos. (SF).** ¿Conoces los beneficios ambientales de la caña de azúcar? Recuperado de <https://ingeniosancarlos.com.co/conoces-los-beneficios-ambientales-de-la-cana-de-azucar/>
- Kanninen, M. (s.f.).** Secuestro de carbono en bosques, su papel en el ciclo global. CATIE. Recuperado de <https://www.fao.org/4/y4435s/y4435s09.htm>
- Luca E. F., Chaplot, Vincent, Mutema M., Feller Christian, Ferreira M. L., Cerri C. C., Couto H. T. Z. (2018).** Effect of conversion from sugarcane preharvest burning to residues green trashing on SOC stocks and soil fertility status: results from different soil conditions in Brazil. *Geoderma*, 310, p. 238-248. ISSN 0016-7061. Recuperado de <https://www.documentation.ird.fr/hor/PAR00016809>
- Martínez Castillo, R., (2007).** Algunos aspectos de la Huella Ecológica. *InterSedes: Revista de las Sedes Regionales*, VIII (14), 11-25. [fecha de Consulta 9 de Octubre de 2024]. ISSN: 2215-2458. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=66615071002>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2010).** Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010: Informe principal (Estudio FAO: Montes 163). FAO. ISBN 978-92-5-306654-4. Recuperado de <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/db68611f-6afe-43b1-ab71-5a40bdaa454f/content>
- Pradhan, A., Wakchaure, G. C., Shid, D., Minhas, P. S., Biswas, A. K., & Reddy, K. S. (2023).** Impact of residue retention and nutrient management on carbon sequestration, soil biological properties, and yield in multi-ratoon sugarcane. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1288569. Recuperado de <https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2023.1288569/full>
- Smith, J., Sabogal, C., W. de Jong, & Kaimowitz, D. (1997).** Bosques secundarios como recurso para el desarrollo rural y la conservación ambiental en los trópicos de América Latina. Bogor: CIFOR. ISSN 0854-9818. Recuperado de <https://dlc.dlib.indiana.edu/dlcrest/api/core/bitstreams/813666a9-c496-41e6-addc-d2f05d805888/content>
- Wackernagel, M., & Rees, W. E. (1996).** Our ecological footprint: reducing human impact on the earth. Gabriola Island, BC; Philadelphia, PA, New Society Publishers.



Conclusiones y Capítulo 4: discusiones finales

El análisis de los datos de la Huella Hídrica (HH), la Huella de Carbono (HC) y la Huella Ecológica (HE) entre 1960 y 2022 revelan una tendencia preocupante de aumento en la presión sobre los RRNN del monocultivo de la caña de azúcar y el medio ambiente en general (Tabla 4.1).

El análisis de la evolución del cultivo de caña de azúcar desde los años sesenta del siglo pasado y hasta la actualidad revelan una clara correlación entre el crecimiento del monocultivo y los efectos socioambientales asociados; como se mencionó anteriormente, el área sembrada se ha multiplicado por 4.3 veces, pasando de 61 a

[62]

Huella	Absolutos		Crecimiento Absoluto	Aporte al crecimiento (%)	Crecimiento Total(%)	Crecimiento Promedio Anual (tasa aritmética)
	1960	2022	1960-2022	1960-2022	1960-2022	1960-2022
Huella Hídrica Azul (Hm3)	219	695	476	9,6%	217,4%	3,5%
Huella Hídrica Verde (Hm3)	514	4	4	73,5%	711,1%	11,5%
Huella Hídrica Gris (N) (Hm3)	160	1	842	16,9%	526,3%	8,5%
Huella Hídrica TOTAL 1 (Hm3)	893	6	5	100%	557%	9,0%
Huella Hídrica Gris (2,4-D) (Hm3)	28	178	150	97,3%	528,3%	8,5%
Huella Hídrica TOTAL 2 (Hm3)	29	183	154	100%	529,2%	8,5%
Huella de Carbono (ton/CO2eq)	56.145,5	106.127,9	49.982,4	NA	89%	1,4%
Huella Ecológica bosque primario (ha)	- 113,5	94,0	207,54	NA	-183%	-
Huella Ecológica bosque intermedio (ha)	- 272,5	225,6	498,1	NA	-183%	-
Huella Ecológica caña de azúcar (ha)	- 17.973,5	14.882,7	32.856,22	NA	-183%	-

Tabla 4.1 Síntesis de resultados de las Huellas Hídrica, de Carbono y Ecológica en la Cuenca Alta del Río Cauca, 1960 – 2022
Fuente: elaboración propia

265 mil ha entre 1960 y 2022, lo que significó un aumento del área ocupada por el cultivo en la CARC desde 2,7% en 1960 a 11,6% en 2022⁴⁰. Esta expansión ha traído consigo una mayor presión sobre el agua y los ecosistemas circundantes. En primer lugar, la Huella Hídrica Total₁ creció en forma significativa en un 557% durante este período, multiplicándose por 6,6 veces en el primer escenario analizado y creciendo 529% en el segundo (HHT₂). Por su parte, la cantidad de agua utilizada directamente en el cultivo de caña, medida como la suma de la Huella Hídrica Verde y la Huella Hídrica Azul, se ha multiplicado por 6.6 veces, pasando de 733 Hm³ a 4.864 Hm³, lo que ha incrementado significativamente la presión sobre el recurso hídrico. A su vez, la Huella Hídrica Gris se ha multiplicado por 6,4 veces al pasar en el primer escenario (Nitrogeno) de 160 a 1.002 Hm³ y de 28.408 Hm³ a 178.482 Hm³ en el escenario del herbicida 2,4-D, contribuyendo aún más a la conflictividad ambiental relacionada con el agua. Este crecimiento global en las Huellas Hídricas refleja una intensificación del monocultivo y sus efectos sobre los ecosistemas acuíferos locales.

Tales dinámicas de Agua, plantean un desafío en términos de sostenibilidad, especialmente en un contexto de Cambio Climático que altera los patrones de disponibilidad de agua dulce. Desde la EE, esto subraya la necesidad de entender que los recursos hídricos no son infinitos y que un uso intensivo y continuo ha llevado a un deterioro en la principal fuente de hídrica de la región como es el Río Cauca, afectando tanto a los ecosistemas como a las poblaciones dependientes del recurso.

Por su parte, la Huella de Carbono ha crecido en un 89% en las últimas seis décadas. Esto evidencia la fuerte dependencia de las actividades económicas del uso de combustibles fósiles. Aunque su tasa de crecimiento anual promedio del 1,03% parece modesta, este indicador señala una contribución sostenida al cambio climático a través de emisiones de GEI. Esto es un indicativo de un modelo de desarrollo basado en una economía intensiva en carbono, característico de los patrones industriales y de transporte de la segunda mitad del siglo XX y las primeras décadas del XXI. Para la Economía Ecológica, este tipo de crecimiento es insostenible porque ignora los límites biofísicos del planeta, donde la capacidad de los ecosistemas para absorber y neutralizar los GEI es superada por las tasas de emisión. Además, este modelo de desarrollo compromete la estabilidad climática y, por ende, la habitabilidad del planeta a largo plazo.

Asimismo, la Huella Ecológica de la caña también ha experimentado un crecimiento negativo. El cambio de una HE negativa en 1960 (-17.974 ha) a una positiva en 2022 (14.883 ha) evidencia una transformación en la dinámica de absorción de carbono del territorio: mientras que en 1960 los ecosistemas locales eran capaces de absorber más GEI de los que se emitían, para 2022 esta capacidad se ha revertido, posiblemente por el incremento en las emisiones asociadas a prácticas

agrícolas más intensivas o la reducción de la cobertura forestal. Es el resultado de un desequilibrio entre las emisiones y el secuestro de carbono, donde las emisiones superaron la capacidad de absorción.

Aunque los resultados de la Huella Ecológica (HE) no muestran un sobrepasamiento ambiental directo, la expansión del territorio destinado al cultivo de caña de azúcar en el valle Geográfico del río Cauca plantea desafíos desde el punto de vista de la sustentabilidad. La creciente toma de hectáreas para este cultivo puede influir en otros aspectos importantes para la población aledaña y para los departamentos que componen la CARC, como la seguridad alimentaria. Esto, porque a medida que más tierras se destinan a la producción de caña de azúcar, se reduce la disponibilidad de espacio para otros cultivos alimentarios; esta situación puede afectar la capacidad local para satisfacer sus necesidades alimenticias y obliga a adoptar nuevas prácticas como la exportación de alimentos desde otros departamentos o países. Este patrón de uso del suelo plantea preocupaciones sobre el desequilibrio social que pueda generar la expansión agrícola, en la región así como sobre sus posibles implicaciones para la estabilidad socioeconómica de las comunidades locales.

Ahora, un análisis de la dinámica de los insumos utilizados para que generar estas huellas nos resulta también útil para identificar presiones ambientales adicionales del cultivo de caña de azúcar sobre la CARC. La Tabla 4.2 muestra esta realidad.

El uso intensivo de fertilizantes y otros agroquímicos e insumos necesarios para mantener la productividad del suelo, el control de arvences y plagas, los madurantes y los combustibles para la operación de diferentes procesos agrícolas en el monocultivo, son factores adicionales que subrayan la presión sobre los RRNN y el ambiente. En términos anuales, la aplicación de fertilizantes nitrogenados, fosfóricos y potásicos ha mostrado un crecimiento significativo entre 1960 y 2022. La urea aumentó de 9,4 millones de kg/año a 54,8 millones de kg/año, el fósforo (P₂O₅) de 2,5 millones de kg/año a 14,4 millones de kg/año, y el potasio (K₂O) de 12 millones de kg/año a 69,6 millones de kg/año, con un crecimiento total del 481% y de 7,8% promedio anual en cada caso. Este uso excesivo ha contribuido significativamente a la contaminación del suelo y de los cuerpos de agua. La magnitud de la presión se evidencia al estimar la cantidad de fertilizantes arrojados al suelo en forma acumulada a lo largo del periodo analizado. Estos equivalen a 2,1, 0,5 y 2,6 millones de toneladas de urea, fosforo y potasio vertidos en la tierra durante estos 62 años de análisis. En cuanto a herbicidas, productos como la Ametrina, el 2,4-D y el Diuron también registraron incrementos del 330% en su uso. Por ejemplo, la Ametrina pasó de 184.800 litros/año en 1960 a 795.414 litros/año en 2022, mientras que el 2,4-D y el Diuron aumentaron de 92.400 litros/año a 397.707 litros/año cada uno. Igualmente, si estimamos la cantidad de herbicidas arrojados al suelo y a las plantas a lo largo del tiempo magnificamos la presión sobre el ambiente. Estos alcanzan una cantidad muy significativa: 30,5,

40. Según El CONPES 3624 «La cuenca alta del Río Cauca tiene un área aproximada de 22.900 Km², de la cual el 32% se encuentra en el departamento del Cauca, 47% en el Valle, 13% en Risaralda, y 8% en Quindío» Véase <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3624.pdf>

Producto		Absolutos (A)		Crecimiento absoluto (B)	Crecimiento total (%) (C)	Crecimiento promedio anual (%) (D)	Total suma de input acumulado durante todo el periodo ⁴¹ (E)
		1960	2022	1960-2022	1960-2022	1960-2022	1960-2022
Fertilizantes	Fertilizante Nitrogenado (UREA) (Kg/ha/año)	9.427.478	54.760.322,6	45.332.844,3	481%	7,8%	2,1 millones de ton
	Fertilizante Fosfórico (P2O5) (Kg/ha/año)	2.485.979	14.440.023,3	11.954.044,4	481%	7,8%	0,5 mill.ton
	Fertilizante potásico (K2O) (Kg/ha/año)	11.979.968	69.586.679,9	57.606.711,9	481%	7,8%	2,6 mill.ton
Herbicidas	Ametrina (L/año)	185	795414	610.614,0	330%	5,3%	30,5 mill. litros
	2,4 D (L/año)	92	397.707,0	305.307,0	330%	5,3%	15,25 mill.litros
	Diuron (L/año)	92	397.707,0	305.307,0	330%	5,3%	20,33 mill.litros
Madurante	Sal isopropilamina de glifosato (L) (b)	36	74.696,7	39.029,7	109%	1,8%	6,8 mill. litros
Uso de Diesel (L/ha)	Para preparación de suelos (L)	1.557.111	6.702.099,4	5.144.988,3	330%	5,3%	257 mill. litros
	Para aplicación de fertilizantes (L)	1.109.640	6.971.692,0	5.862.052,0	528%	8,5%	227,6 mill. litros
Quema de biomasa	Quema de caña en campo (ha/año)	-	37.348,4	-	-	-	NA

Tabla 4.2 Presiones ambientales generadas por algunos de los insumos requeridos para el cultivo de caña de azúcar (1960-2022)

Fuente: elaboración propia

15,25 y 20,33 millones de litros respectivamente para cada uno de los herbicidas usados arrojados sobre el cultivo.

Por su parte, el glifosato sobre el cultivo como madurante, también tuvo una dinámica significativa que alcanzó el 1,8% promedio anual que le permitió más que duplicarse en cantidad de 35.667 a 74.697 litros. Al sumar todas las cantidades anuales arrojadas durante el periodo esto alcanza el agregado de 76,8 millones de litros, evidenciando la presión sobre el ambiente, la biodiversidad y el recurso hídrico.

De la misma manera, el consumo de diésel utilizado tanto para la preparación de suelos como para la aplicación de fertilizantes, también ha crecido de manera considerable. En preparación de suelos, se pasó de 1,6 millones de litros/año en 1960 a 6,7 millones de litros/año en 2022, mientras que, en aplicación de fertilizantes, el consumo aumentó de 1,1 millones de litros/año a 7 millones de litros/año,

con un crecimiento total del 528% (Tabla 4.2) Si sumamos los dos y los agregamos para todo el periodo, esto arroja una suma de 485 millones de litros que convertidos en Gases Efecto Invernadero (GEI)⁴² esto significa un total de 1,3 millones de toneladas de CO2 acumuladas a los largo del periodo. Este modelo de cultivo intensivo no solo incrementa la dependencia de combustibles fósiles, sino que también genera una serie de impactos ambientales y sociales, incluyendo la contaminación por agroquímicos, la quema al aire libre de biomasa y la generación de GEI.

Los datos obtenidos proporcionan evidencia empírica sobre las presiones y los impactos ambientales del monocultivo de la caña de azúcar, en la región de la Cuenca Alta del río Cauca (CARC). Estos resultados muestran que, a lo largo de estos 62 años analizados, el cambio en el uso del suelo ha sido notable al sustituir cultivos de alimentos y áreas de conservación de ecosistemas que actuaban como sumideros

41. Este indicador corresponde a la suma total de input arrojado al suelo o las plantas durante todo el periodo de estudio (1960-2022).

42. 1 litro de diésel = 2,67 Kg. de CO2.

de carbono y fuentes de biodiversidad. En su lugar, han emergido vastas extensiones de monocultivo de caña que demandan grandes cantidades de agua, tierra y energía proveniente de recursos fósiles en forma de agroquímicos, fertilizantes y maquinaria agrícola. Este proceso ha ocasionado transformaciones profundas en los ecosistemas locales y regionales, tales como la disminución del Bosque Seco Tropical (BST), una zona actualmente en peligro de extinción, la desecación y degradación de los humedales y la expansión de los cultivos hacia las márgenes de los ríos, afectando la franja riparia de los mismos.

Desde una perspectiva de Justicia Ambiental y responsabilidad intergeneracional, estos resultados llaman a la reflexión sobre los costos sociales y ecológicos de las decisiones actuales. La Economía Ecológica enfatiza que, aunque el crecimiento económico ha permitido mejorar ciertos indicadores de bienestar, sus beneficios están distribuidos de manera desigual y sus costos ambientales son, en gran medida, transferidos a los menos privilegiados, a los ecosistemas y a las generaciones futuras. El impacto de la escasez de agua, las consecuencias del Cambio Climático y la pérdida de biodiversidad no sólo afectan de manera directa a las comunidades más vulnerables,

sino que también perpetúan inequidades estructurales y agravan las brechas de acceso a recursos esenciales.

Así, el crecimiento observado en las diferentes Huellas de presión ambiental apunta hacia un modelo de desarrollo que es insostenible en el largo plazo, pues compromete la capacidad de la región y del planeta para satisfacer las necesidades básicas de las generaciones futuras. Este análisis sugiere que es urgente reevaluar el modelo de crecimiento económico actual, particularmente en torno a la producción de caña de azúcar en la Cuenca Alta del Río Cauca. Pero igualmente, se hace necesario también el cambio de modelo tecnológico basado en la revolución verde, hacia una perspectiva agroecológica, perspectiva que puede extrapolarse a otras regiones donde la agricultura extensiva y los monocultivos son relevantes económicamente. Es fundamental priorizar la implementación de políticas que respeten los límites biofísicos y promuevan una distribución equitativa de los recursos y reduzcan los impactos ambientales. Sólo de esta forma se puede avanzar hacia una sociedad que garantice el bienestar social y ambiental en el presente sin comprometer las posibilidades de vida de las futuras generaciones.



Anexos

Anexo 1. Funciones de la Naturaleza

El presente anexo reseña, brevemente y a grandes rasgos, las funciones de la Naturaleza dentro de los sistemas económico y social. Primero, se discuten los RRNN desde una perspectiva ecológica (1.1.1); luego, se discuten las metodologías de medición de estos recursos (1.2) a partir de dos vectores: la cuantificación y análisis en términos monetarios (1.2.1) y biofísicos (1.2.2). Por su parte, la siguiente sección define las funciones de la Naturaleza y las desglosa en tres categorías principales: primero, la función abastecedora (1.3.1), que incluye recursos renovables y no renovables; la función asimiladora (1.3.2), que describe la capacidad de la naturaleza para absorber y neutralizar desechos; y la función de soporte de vida (1.3.3), que subraya los procesos que sustentan la biodiversidad y, en general, la vida en el planeta. Finalmente, desde una perspectiva antropocéntrica, se define y explica el concepto de servicios ecosistémicos, es decir, los beneficios que los ecosistemas proporcionan a la humanidad (desde la provisión de RRNN hasta la regulación de procesos ambientales esenciales).

1.1 Los Recursos Naturales (RRNN)

1.1.1 Desde la Ecología

La Ecología es una ciencia interdisciplinaria que estudia las interacciones entre los organismos y su entorno, proporcionando una comprensión fundamental de los principios que rigen la vida en la Tierra. Sus bases teóricas se apoyan en conceptos clave de la biología y la física que son esenciales para entender la complejidad y la dinámica de los ecosistemas, aspectos que permiten comprender cómo las actividades humanas afectan a los sistemas naturales. Desde la *biología*, la Ecología adopta conceptos como la interdependencia entre los organismos y su entorno. Esta interdependencia se manifiesta en las cadenas alimenticias, la biodiversidad y la sucesión ecológica⁴³, que son

procesos fundamentales para el mantenimiento de los ecosistemas. Odum (1971) destaca que la salud de un ecosistema depende de su biodiversidad y de las relaciones equilibradas entre sus componentes, lo que permite una mayor resiliencia ante perturbaciones externas.

De la misma manera, la *física* contribuye a la Ecología principalmente a través del análisis de la termodinámica, que estudia los flujos de energía y materia en los sistemas naturales. La comprensión de estos flujos destaca los límites termodinámicos al crecimiento económico, en otras palabras, es crucial para reconocer que el crecimiento perpetuo es físicamente imposible en un planeta finito (Georgescu-Roegen, 1971). La primera ley de la termodinámica, que establece que *la energía no se crea ni se destruye, sino que se transforma*, permite entender cómo la energía solar es capturada por los productores primarios y transferida a lo largo de las cadenas alimentarias. La segunda ley de la termodinámica, que introduce el concepto de entropía (o grado de desorden), señala que, en cada transferencia de energía, una parte se disipa en forma de calor, aumentando el desorden del sistema (Georgescu-Roegen, 1971). Estos principios físicos subrayan los límites biofísicos del crecimiento y la eficiencia energética de los ecosistemas.

La integración de estos conocimientos *biológicos y físicos* en la Ecología ha permitido desarrollar una comprensión holística de los sistemas naturales. Los análisis ecológicos, que combinan estas perspectivas, son fundamentales para evaluar la sostenibilidad de las actividades humanas y la capacidad de carga de los ecosistemas.

Ahora, los RRNN son entendidos desde esta perspectiva como los elementos y procesos esenciales de la Naturaleza⁴⁴ que garantizan el funcionamiento de los ecosistemas y que, en últimas, sostienen la vida humana y no-humana. Estos recursos no son simplemente un capital natural dispuesto a ser explotado en pos de maximizar el crecimiento económico, sino que son componentes vitales de la biodiversidad y

[66]

43. Este concepto se refiere a la sustitución de unas especies por otras. En síntesis, a la evolución de los ecosistemas a lo largo del tiempo.

44. Las bases materiales incluyen la energía, el agua, el aire, los suelos, los minerales, la flora y la fauna, etc.

del equilibrio ecológico. Si estos elementos sufren trastornos, la base de toda vida se verá amenazada.

Es importante mencionar que los análisis de la Ecología, basados en la *biología* y la *física*, han sido fundamentales en la creación de la Economía Ecológica (EE) como escuela de pensamiento. La EE, surge precisamente de esta integración interdisciplinaria. Esta rama reconoce que los sistemas económicos están incrustados en los sistemas ecológicos, y adopta de la Ecología la importancia de mantener la biodiversidad y la integridad ecológica, subrayando que los sistemas económicos deben operar dentro de los límites naturales (Daily, 1997). Finalmente, la EE, al integrar estas perspectivas y enfoques éticos, ofrece una alternativa robusta y multidimensional para abordar los problemas ambientales y promover la sostenibilidad a largo plazo (Costanza et al., 1997).

1.2 Medición de los RRNN

En esta sección se abordará, a grandes rasgos, cómo en la actualidad se realiza la medición de los RRNN, reconociendo que existen diversas perspectivas y metodologías para valorarlos. En primer lugar, se reconoce que no todos los RRNN son medibles económicamente y esto hace que requieran otros lenguajes de valoración. Aunque este apartado no abordará los diferentes lenguajes de valoración de la naturaleza, sí se hará una diferenciación entre los enfoques usados por dos escuelas: la economía ambiental y la ecológica.

1.2.1 La visión ortodoxa en la contabilidad de los RRNN

De esta manera, observamos que la medición económica convencional de los RRNN se da desde una perspectiva ortodoxa que ve a la naturaleza a través del modelo de mercado. Este enfoque, utilizado principalmente bajo el marco de la economía ambiental, plantea diferentes herramientas y métodos dentro del sistema económico que busca, en síntesis, *economizar* a la naturaleza utilizando el marco de la contabilización de los servicios y beneficios que ésta proporciona.

• La valoración monetaria del medio ambiente

Este marco de análisis se centra en asignar un valor económico a los RRNN y a los servicios ecosistémicos. Se basa en la premisa de que todos los bienes y servicios, incluidos los ambientales, pueden ser valorados en términos monetarios. Entonces, la economía ambiental utiliza *indicadores monetarios* para valorar y evaluar los impactos de la economía sobre el medio ambiente, tanto como para evaluar los beneficios de las actividades de conservación, protección, preservación o restauración de los RRNN y ambientales. Sin embargo, este enfoque tiene sus limitaciones, ya que no todos los valores y beneficios de la naturaleza pueden ser adecuadamente capturados a través de una valoración monetaria (Martínez-Alier y Roca-Jusmet, 2018).

• Soluciones propuestas: las externalidades, disposición a pagar e impuestos pigouvianos:

Para abordar las «fallas del mercado» en la gestión de los RRNN, la economía ambiental propone varias soluciones. Una de ellas, es concebir

al daño ambiental como una externalidad. Las externalidades se refieren a los efectos secundarios de las actividades económicas que no se reflejan en los precios del mercado⁴⁵. Para corregir estas fallas, se utilizan impuestos pigouvianos, que son gravámenes impuestos a actividades que generan externalidades negativas, con el objetivo de internalizar estos costos sociales en el precio de mercado (Klink y Alcántara, 1994). Otro método utilizado es la disposición a pagar, que se usa para medir el valor que las personas *asignan* a los beneficios ambientales. Estas técnicas pueden implicar encuestas, estudios o experimentos que indaguen en los individuos cuánto estarían dispuestas a pagar por mejoras o por evitar deterioros ambientales. Desde esta visión, se defiende cómo estas medidas infieren en las políticas públicas y alientan inversiones en conservación ambiental (Klink y Alcántara, 1994).

• El Producto Interno Bruto y sus limitaciones en la contabilidad ambiental

El Producto Interno Bruto (PIB) es el indicador de la actividad económica por excelencia, sobre todo en países como Colombia. Sin embargo, éste tiene importantes limitaciones en la contabilidad ambiental: una de las críticas es que no considera la degradación del capital natural ni los costos ambientales de la actividad económica. Además, existen actividades económicas que, aunque generen rendimientos económicos, conllevan en contraparte una alta degradación ambiental. Por ejemplo, una actividad como la deforestación puede incrementar el PIB dado el comercio de madera, pero no considerará la pérdida de biodiversidad y de servicios ecosistémicos que los bosques proporcionan. En esencia, según Klink y Alcántara (1994), dado que el PIB puede incrementar actividades que dañan el medio ambiente, es un indicador incompleto de bienestar y sostenibilidad.

1.2.2 La visión heterodoxa en la contabilidad de los RRNN

Por su parte, una visión menos hegemónica del sistema tradicional defiende que no todos los valores y beneficios de la naturaleza pueden ser adecuadamente capturados a través de una valoración monetaria. Por esta razón, las visiones heterodoxas de los RRNN adoptan una perspectiva diferente: en el caso de la EE, ésta se apoya en herramientas como los indicadores de presión. Esta visión busca ecologizar la economía al usar indicadores biofísicos de sustentabilidad para evaluar la presión del sistema económico sobre el medio natural.

• Los indicadores de presión: Huella Ecológica, Huella de Carbono, Huella Hídrica

Los indicadores de presión proporcionan una visión más completa del impacto humano sobre el medio ambiente, pues además de ayudar a entender la magnitud del impacto ambiental, también permiten identificar áreas críticas donde se necesita intervención. La Huella Ecológica, por ejemplo, mide la demanda de RRNN en términos de *tierra*, para sostener a una población. La Huella de Carbono, calcula las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) producidas, principalmente, por

[67]

45. Un ejemplo clásico es la contaminación: una fábrica que emite gases tóxicos puede no pagar por los daños que causa al medio ambiente y a la salud pública.

actividades humanas, mientras que la Huella Hídrica evalúa el consumo de agua, considerando tanto su uso directo como indirecto (Martínez-Alier, 2002). Estos indicadores de presión también buscan mostrar que existen límites biofísicos del crecimiento económico.

• La Apropiación Humana de la Producción Primaria Neta (AHPPN)

La Apropiación Humana de la Producción Primaria Neta (AHPPN) es un indicador que mide la cantidad de biomasa que los seres humanos extraen de los ecosistemas. Este indicador permite evaluar la presión humana sobre la capacidad productiva de la biósfera y ayuda a entender los límites biofísicos del crecimiento económico. Es crucial para identificar niveles insostenibles de explotación de los recursos naturales. La AHPPN destaca la necesidad de gestionar la producción y el consumo de manera que no excedan la capacidad regenerativa de los ecosistemas (Martínez-Alier, 2002).

• La creciente demanda de energía

La EE también aborda la creciente demanda de energía y su impacto en los RRNN. La Tasa de Retorno Energético (o EROI, por sus siglas en inglés) es un indicador que mide la eficiencia energética de los procesos de producción y consumo, y es fundamental para comprender la sostenibilidad a largo plazo de las fuentes de energía y para planificar una transición hacia fuentes más sostenibles. Este enfoque subraya la importancia de considerar los costos ambientales y sociales de la producción y consumo de energía, especialmente en relación con las fuentes no renovables (Martínez-Alier, 2002).

Una buena síntesis de los postulados expuestos con anterioridad la recoge Castiblanco (2007) en su artículo La economía ecológica: una disciplina en busca de autor, expresando que:

“La economía ambiental hace énfasis en la importancia de la valoración económica, la asignación de derechos de propiedad y la incorporación de mecanismos de mercado en la regulación y gestión de los bienes públicos o ‘libres’ que integran el medio ambiente. Estos valores teóricos están apoyados en el cálculo de los ‘costos de oportunidad’, ‘precios sombra’ o ‘valores de contingencia’. Por el contrario, la economía ecológica considera que los recursos naturales y el medio ambiente tienen valor

independientemente de que formen parte o no de las preferencias o necesidades de la especie humana y se preocupa en primer lugar por la naturaleza física de los bienes a gestionar y la lógica de los sistemas que los envuelven (Naredo, 1992)” (p. 15).

En síntesis, existe un contraste evidente entre las metodologías y lógicas de medición de los RRNN que depende del enfoque utilizado. Se retoma el postulado de Gómez-Baggethun (2018) que alienta la necesidad de trascender del reduccionismo monetario. El presente trabajo de investigación reconoce la necesidad de utilizar indicadores biofísicos, pues considera esta perspectiva más amplia y multidimensional, y que contribuye en la búsqueda de la sostenibilidad ecológica. Y, sin embargo, también utiliza métodos convencionales dadas las limitaciones observadas en las herramientas de medición: *“existen, no obstante, valores económicos a los que la Economía Ecológica no renuncia. Se busca asignarles un espacio en donde tiene sentido utilizarlos y descartarlos en donde no lo tiene, al igual que dar espacio a la valoración ecológica (alrededor de la biodiversidad, el endemismo, y otros factores), al análisis biofísico y metabólico, y también a la valoración social, simbólica y cultural”* (Gómez-Baggethun, 2018).

1.3 Las Funciones de la Naturaleza

Las funciones de la naturaleza o funciones ambientales se refieren a los roles fundamentales que desempeñan los ecosistemas y los recursos naturales en el mantenimiento y la sustentabilidad de la vida humana y del planeta. En otras palabras, son aquellos servicios que posibilitan las actividades sociales y económicas, además del soporte de la vida (Pérez y Rojas 2010). Estas funciones se subdividen típicamente en varios tipos principales, abordados en las próximas secciones.

1.3.1 Función abastecedora de la Naturaleza

La oferta de alimentos, recursos e insumos para los sistemas social, económico, y los demás sistemas de vida es, en síntesis, la función abastecedora de la Naturaleza. Esta función se centra en la capacidad de los ecosistemas para proporcionar recursos naturales *renovables* y *no renovables* que son esenciales para el sustento humano y para el desarrollo de la economía. La Figura 1 ilustra la función abastecedora y los eventuales problemas que se generarían en caso de que esta presentara un desequilibrio y no lograra desempeñar adecuadamente su rol.

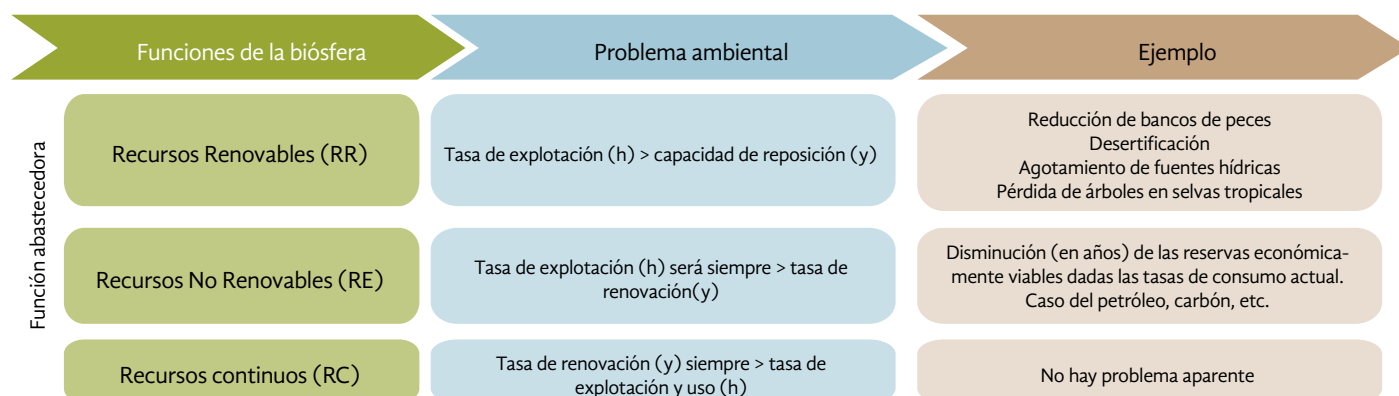


Figura 1. Función abastecedora de la Naturaleza
Fuente: elaboración propia con base en Pérez y Rojas (2010)

• Recursos Renovables

Los recursos renovables son aquellos RRNN que pueden regenerarse a una tasa comparable a la de su explotación, manteniendo así su disponibilidad a lo largo del tiempo. Algunos ejemplos de estos recursos son la biomasa, el agua, el aire, la flora, la fauna o el suelo y los productos agrícolas. Sin embargo, aunque su nivel de renovación es rápido, esto no significa que los recursos sean inagotables, y su renovación depende de las condiciones ambientales y de la capacidad de los ecosistemas para mantener sus funciones biológicas. Como señala Martínez-Alier (2002), la consideración de los límites biofísicos y la capacidad de carga de los ecosistemas es fundamental para asegurar la sostenibilidad de los recursos renovables.

• Recursos No Renovables

Los recursos no renovables, por su parte, son aquellos RRNN que existen en cantidades finitas (tienen una oferta fija) y no se regeneran a una escala temporal humana considerable, sino que su renovación se da en largos períodos de tiempo. Estos recursos incluyen minerales, metales y combustibles fósiles como el petróleo, el gas natural y el carbón. La explotación de recursos no renovables implica su agotamiento eventual, lo que subraya la necesidad de una gestión prudente y de la búsqueda de alternativas sostenibles. Según Daly y Farley (2011), la EE enfatiza en considerar las tasas de agotamiento de estos recursos y los impactos ecológicos asociados con su extracción y uso.

1.3.2 Función asimiladora de la Naturaleza

La función asimiladora o receptora de la naturaleza hace referencia a la capacidad de los ecosistemas y de la biósfera para absorber, neutralizar y reciclar los desechos y contaminantes generados por las actividades humanas, es decir, permite recibir y asimilar los subproductos que son arrojados por las actividades socioeconómicas a los componentes tanto bióticos como abióticos de un ecosistema. Esta función es esencial para mantener la calidad del aire, el agua y los suelos, y para prevenir la acumulación de sustancias tóxicas que pueden perjudicar tanto a los ecosistemas como a la salud humana. La EE resalta la importancia de no superar los límites de esta capacidad asimiladora, ya que hacerlo puede llevar a la degradación ambiental y a la pérdida de servicios ecosistémicos vitales (Costanza et al., 1997).

Por su parte, la Figura 2 ilustra la función receptora de la Naturaleza y, al igual que la anterior Figura, muestra los problemas generados en caso de que tuviese desequilibrios y limitaciones en el desempeño de su papel.

1.3.3 Función soporte de vida de la Naturaleza

Finalmente, la función soporte de vida se refiere a los procesos y condiciones naturales que son esenciales para la existencia y mantenimiento de la vida en la Tierra. Esta función garantiza el equilibrio de los ecosistemas e incluye procesos como la regulación del clima, la formación del suelo, el ciclo de nutrientes, y la provisión de hábitats para la biodiversidad. Estos procesos son fundamentales para la producción de alimentos o el suministro de agua limpia. La función soporte de vida

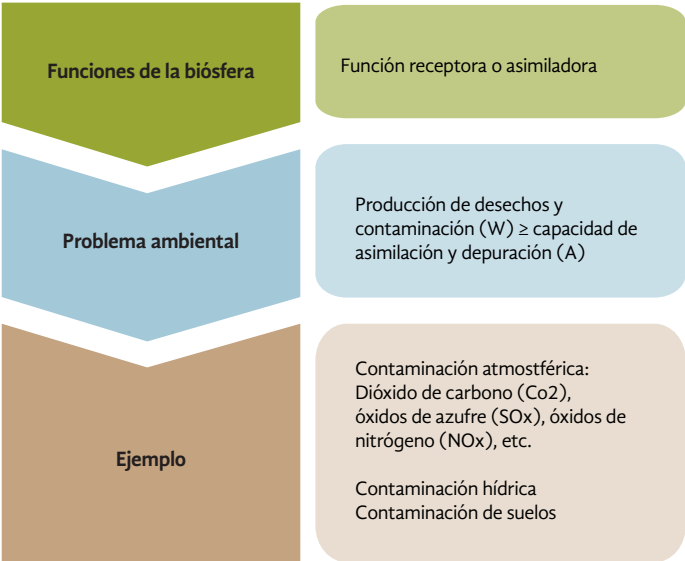


Figura 2. Función asimiladora de la Naturaleza
Fuente: elaboración propia con base en Pérez y Rojas (2010)

también es provisorio de atractivos para el disfrute de la naturaleza, como la recreación o la satisfacción estética de contemplar un paisaje (Pérez y Rojas, 2010).

El concepto de *función ambiental* ha tenido diferentes evoluciones teóricas a lo largo del tiempo; y una de las corrientes más adoptadas ha sido la redefinición del término como servicios ecosistémicos que, según Fisher et. al (2009) se refieren a “todos los aspectos de los ecosistemas que son utilizados —directa o indirectamente— para producir bienestar al ser humano”, y de los que se hablarán en la próxima sección. Finalmente, la Figura 3 muestra cómo la afectación de las funciones principales de la Naturaleza se manifiesta directamente en el trastorno de la función soporte.

1.3.4 Los Servicios Ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos son definidos como los beneficios directos e indirectos que los ecosistemas naturales proporcionan a la humanidad.

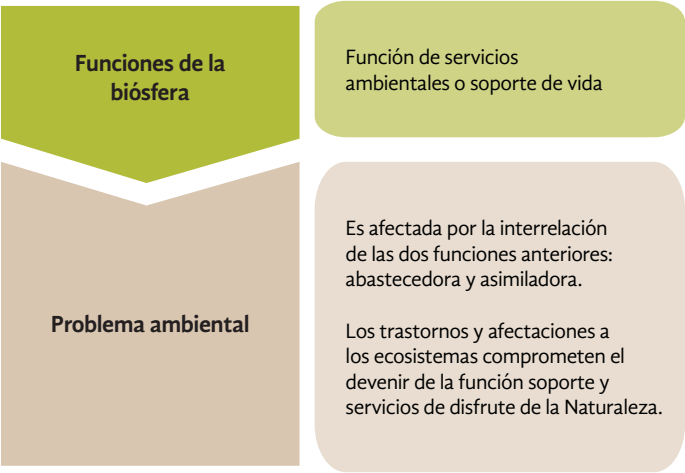


Figura 3. Función soporte de vida de la Naturaleza
Fuente: elaboración propia con base en Pérez y Rojas (2010)

Estos servicios son múltiples, y para identificarlos y caracterizarlos se han clasificado en cuatro categorías principales: regulación, soporte (o sostenimiento), aprovisionamiento (o producción) y cultural (o información). Estos servicios se relacionan a continuación y en la Figura 1.4.

- **Los servicios de regulación:** Incluyen procesos que regulan las condiciones del entorno, como la regulación del clima, prevención de desórdenes naturales, el control de enfermedades, etc. Son cruciales para mantener la estabilidad y la salud de los ecosistemas, así como para proteger a las comunidades humanas de eventos climáticos extremos y otros riesgos ambientales.
- **Los servicios de soporte (o sostenimiento):** Esenciales para la

producción de todos los demás servicios ecosistémicos. Incluyen procesos como la formación del suelo, la fotosíntesis, el ciclo de nutrientes. Sin ellos, los ecosistemas no funcionarían correctamente y la vida no podría mantenerse a largo plazo.

- **Los servicios de aprovisionamiento (o producción):** Ofrecen recursos tangibles como alimentos, materias primas, agua o recursos genéticos.
- **Los Servicios culturales (o de información):** Son los beneficios no materiales que las personas obtienen de los ecosistemas a través de experiencias recreativas, estéticas, espirituales o educativas. Estos servicios contribuyen al bienestar humano y a su calidad de vida.



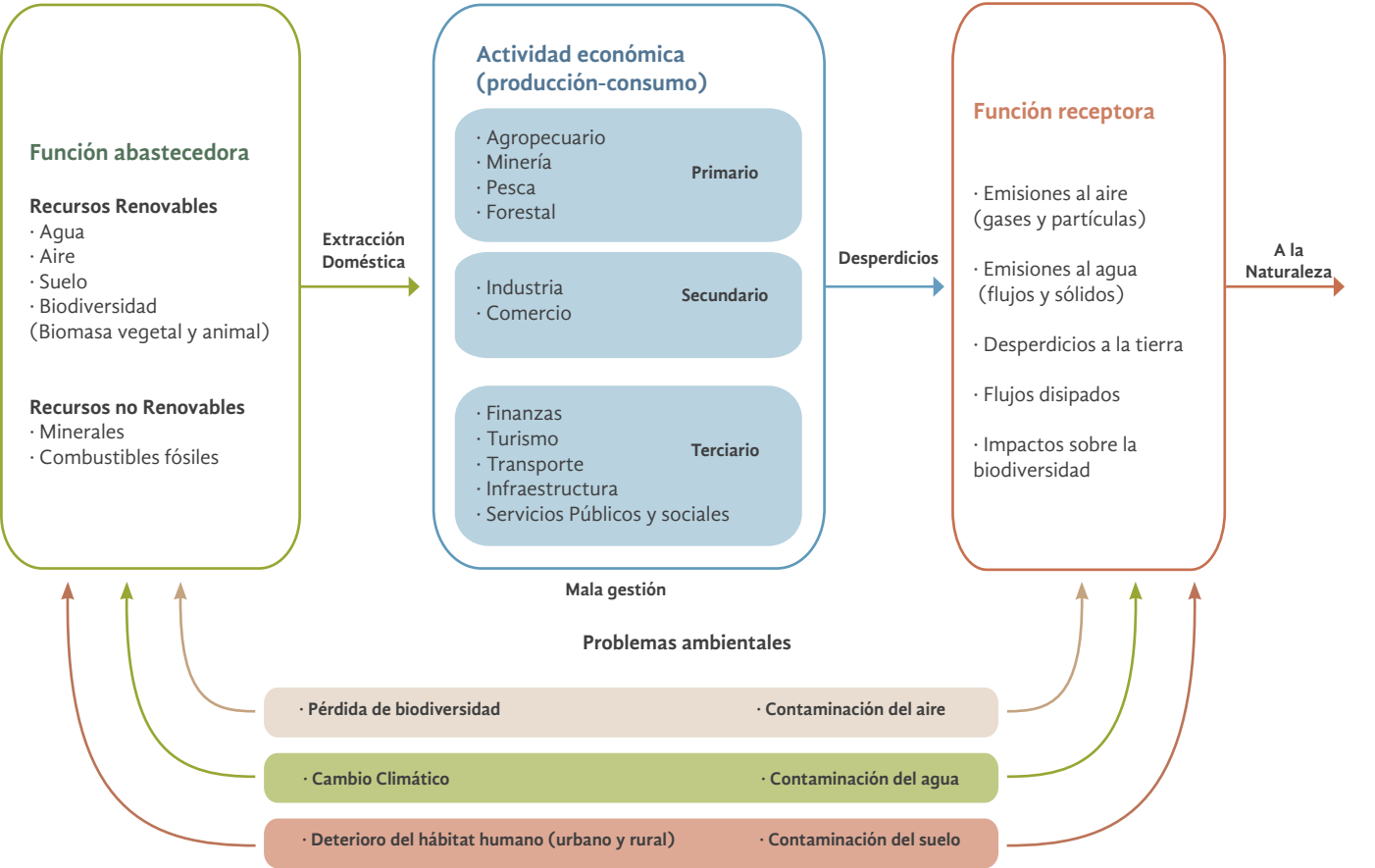
Figura 4. Servicios Ecosistémicos de la Naturaleza.
Fuente: Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) ⁴⁶

46. Vía <https://www.wwf.org.co/?324210/Glosario-ambiental-Servicios-ecosis-que>

La EE hace énfasis en la importancia de estos servicios para la sostenibilidad del sistema socioecológico a largo plazo, destacando que la degradación de los ecosistemas puede llevar a la pérdida de estos servicios vitales. Es importante mencionar en el momento en que existen desequilibrios alguna de las funciones ambientales, o en todas, y éstas tienen problemas para ejercer su rol, es cuando se manifiestan los problemas ambientales.

De esta manera, se ha identificado un marco que muestra cómo la función abastecedora de la naturaleza provee de servicios al sistema socioeconómico y éste, por actividad antropogénica, devuelve a la naturaleza diferentes problemas que la función receptora no alcanza a reparar, debido a su escala (Figura 5).

En esencia, la función soporte de vida de la naturaleza, que incluye procesos químicos, físicos y biológicos esenciales para mantenimiento de la vida, proporciona beneficios a la humanidad de forma material e inmaterial. Sin embargo, los problemas ambientales como la deforestación, la contaminación o el CC, amenazan estos procesos y servicios. La degradación de los ecosistemas no sólo compromete la función soporte de vida, sino que también reduce la capacidad de los ecosistemas para ofrecer servicios para el bienestar humano. Por ello, la EE reconoce la importancia de este enfoque, que destaca la interdependencia entre los sistemas económicos y ecológicos y subraya la importancia de abordar los problemas ambientales desde una perspectiva integrada y sustentable a largo plazo.



[71]

Figura 5. Función soporte de vida y servicios ecosistémicos
Fuente: elaboración propia con base en Pérez y Rojas (2010)

3.6 Referencias

- Castiblanco, C. (2007).** La economía ecológica: una disciplina en busca de autor. *Gestión y Ambiente*, 10(3), 7-21. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169419821001.pdf>
- Costanza, R., Cumberland, J. H., Daly, H., Goodland, R., & Norgaard, R. B. (1997).** *An Introduction to Ecological Economics*. CRC Press.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., ... & van den Belt, M. (1997).** The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253-260.
- Daily, G. C. (Ed.). (1997).** *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press.
- Daly, H. E., & Farley, J. (2011).** *Ecological Economics: Principles and Applications*. Island Press.
- Fisher, B., Turner, R. K., & Morling, P. (2009).** Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 68(3), 643–653. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.09.014>
- Georgescu-Roegen, N. (1971).** *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press.
- Gómez-Baggethun, E. (2018).** Ecologizar la Economía o economizar la Ecología: controversias y desafíos en torno a la valoración de los servicios de los ecosistemas. Recuperado de <https://brage.nina.no/nina-xmlui/bitstream/handle/11250/2576977/GomezBaggethunEcologizarGesti%25C3%25B3nyAmbiente2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Klink, F. A., & Alcántara, V. (Eds.). (1994).** *De la economía ambiental a la economía ecológica*. Icaria.
- Martínez-Alier, J. (2002).** *The Environmentalism of the Poor: A Study of Ecological Conflicts and Valuation*. Edward Elgar Publishing.
- Martínez-Alier, J. Roca-Jusmet, J. (2018).** *Economía Ecológica y Política Ambiental*, FCE, México.
- Naredo, J. M. (1992).** Fundamentos de la economía ecológica. Ponencia presentada al IV Congreso Nacional de Economía. Desarrollo y Medio Ambiente. Sevilla.
- Odum, E. P. (1971).** *Fundamentals of Ecology* (3rd ed.). Saunders.
- Pérez-Rincón, M. A., & Rojas, J. H. (2010).** *Desarrollo sostenible: Principios, aplicaciones y lineamientos de política para Colombia*. Editorial Universidad del Valle, Cali, Colombia, 348 pp. ISBN: 13: 9789586708098.

Anexo 2. Huella Hídrica del cultivo de Caña de azúcar en la CAR⁴⁷

Año	HHgris (Hm3)	HHverde total (Hm3)	HHazul-Net total (Hm3)	HH neta total (Hm3)	HH bruta total (Hm3)
1960	28407,8	514,1	219,7	29141,6	29361,3
1961	29280,2	428,9	300,1	30009,1	30309,2
1962	30121,0	487,1	275,3	30883,3	31158,6
1963	26408,5	412,9	251,7	27073,1	27324,7
1964	28214,9	453,6	259,8	28928,3	29188,1
1965	30271,5	481,5	282,5	31035,5	31317,9
1966	35545,9	593,4	311,3	36450,6	36761,8
1967	37646,2	601,3	349,4	38597,0	38946,4
1968	40220,3	728,1	310,9	41259,3	41570,2
1969	43076,2	684,9	402,2	44163,2	44565,4
1970	42107,0	718,0	357,7	43182,8	43540,5
1971	45643,8	1119,6	327,8	47091,2	47419,0
1972	48548,4	764,8	458,4	49771,6	50230,0
1973	48867,4	896,9	348,7	50113,0	50461,7
1974	49917,5	1001,8	422,6	51341,9	51764,5
1975	53083,8	1217,2	375,7	54676,6	55052,3
1976	53245,8	637,9	649,2	54532,9	55182,1
1977	54812,7	692,3	642,4	56147,4	56789,7
1978	57202,6	861,5	569,0	58633,1	59202,2
1979	61457,0	991,2	563,5	63011,7	63575,2
1980	66830,3	822,2	799,1	68451,6	69250,7
1981	65664,8	1281,3	440,1	67386,1	67826,2
1982	67516,3	1185,1	548,9	69250,4	69799,3
1983	80283,0	965,4	976,2	82224,6	83200,9
1984	72521,2	1594,9	500,1	74616,2	75116,2
1985	71933,4	952,7	810,8	73696,9	74507,7
1986	76505,3	1216,7	714,0	78436,0	79150,0
1987	77633,6	1062,9	849,7	79546,2	80395,9
1988	80257,9	1615,7	501,7	82375,3	82876,9
1989	85309,3	1232,1	887,0	87428,5	88315,5
1990	87479,2	1265,1	908,3	89652,6	90561,0
1991	88917,1	1087,9	1067,6	91072,6	92140,3
1992	90973,7	771,1	1341,6	93086,4	94428,0
1993	89393,1	659,7	1389,7	91442,5	92832,2
1994	95860,3	1812,9	684,5	98357,6	99042,1
1995	117340,0	1474,7	1380,4	120195,1	121575,5
1996	127612,8	2048,1	1177,4	130838,3	132015,7
1997	121968,5	1721,0	1297,7	124987,2	126285,0
1998	124512,5	1984,5	1158,9	127655,9	128814,8
1999	119780,7	2266,0	854,7	122901,4	123756,1
2000	134062,8	2080,6	1288,7	137432,1	138720,8
2001	125453,7	1331,2	1654,8	128439,7	130094,5
2002	115137,9	1250,3	1497,9	117886,1	119384,0
2003	121861,7	1689,7	1318,3	124869,7	126188,0
2004	123463,8	1540,2	1460,8	126464,8	127925,7
2005	126424,3	1771,3	1354,3	129549,9	130904,2
2006	128747,5	1935,2	1283,5	131966,2	133249,6
2007	132516,6	2532,7	926,8	135976,1	136902,8
2008	112896,4	2519,8	525,6	115941,8	116467,4
2009	138163,7	2090,9	1367,0	141621,6	142988,6
2010	123595,7	2815,3	534,1	126945,1	127479,2
2011	133003,3	2981,1	610,1	136594,5	137204,6
2012	148521,1	2456,8	1317,0	152294,9	153611,9
2013	138685,6	2231,5	1275,4	142192,5	143467,9
2014	141395,9	2338,6	1254,1	144988,6	146242,6
2015	142873,3	1840,5	1648,1	146361,8	148009,9
2016	137123,6	2383,7	1131,8	140639,1	141770,9
2017	124212,9	2677,9	647,2	127537,9	128185,1
2018	126588,4	2389,1	907,4	129884,9	130792,3
2019	172134,1	3249,9	1233,0	176617,0	177850,0
2020	175022,1	2767,4	1645,1	179434,7	181079,8
2021	174026,5	3953,4	759,8	178739,7	179499,5
2022	178481,5	4169,0	695,9	183346,4	184042,2

[73]

47. La base de datos utilizada para los cálculos está disponible en la hoja de cálculo titulada "Huella Hídrica CARC (1960-2022)", accesible mediante el siguiente enlace: https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1QRm_stlMnt5T1NRyGkZWJNUtg_T8_Vn0

Anexo 3. Huella de Carbono del cultivo de Caña de azúcar en la CARC⁴⁸

Año	CO2e quema (ton)	CO2e por combustión de Diesel (ton)	CO2e por utilización de Urea (ton)	CO2e por lix y escorrentía de Urea (ton)	Total CO2e Anual (ton)
1973	22233,9	13540,4	20371,2	56,0	56145,5
1974	22535,3	13835,3	22168,1	60,9	58538,6
1975	23778,5	14341,5	23566,4	64,8	61686,4
1976	23665,9	13950,1	19437,6	53,4	57053,5
1977	24173,1	15207,8	21924,5	60,3	61305,5
1978	25031,1	15810,5	26385,6	72,5	67227,2
1979	26683,9	16107,6	26551,7	73,0	69343,3
1980	28791,5	16915,3	27182,2	74,7	72889,1
1981	28069,7	16680,9	26598,5	73,1	71349,1
1982	28637,0	17070,8	28011,5	77,0	73719,3
1983	33787,5	18740,3	24478,5	67,3	77006,3
1984	30283,8	17929,3	24642,8	67,7	72855,9
1985	29805,1	17362,8	26150,5	71,9	73318,4
1986	31453,2	18407,2	26210,8	72,0	76071,2
1987	31669,2	18407,9	26165,6	71,9	76242,6
1988	32485,4	18787,4	27521,1	75,6	78794,0
1989	34261,8	19827,6	28440,9	78,2	82530,3
1990	34860,4	20574,2	29496,1	81,1	84930,7
1991	35158,2	21295,8	31091,3	85,5	87545,2
1992	35692,0	21876,1	33253,2	91,4	90821,3
1993	34799,5	22653,4	38732,5	106,5	96185,3
1994	37027,2	23549,2	38889,7	106,9	99466,1
1995	44971,9	25983,0	32830,2	90,2	103785,2
1996	48529,2	27272,1	30897,8	84,9	106699,2
1997	46022,5	27274,4	33567,1	92,3	106864,1
1998	46617,6	27804,8	34477,4	94,8	108899,8
1999	44497,7	27358,8	37998,1	104,4	109854,5
2000	49416,5	28697,4	34017,2	93,5	112131,1
2001	45884,0	27446,4	32379,0	89,0	105709,3
2002	52245,6	27432,3	43508,0	119,6	123185,9
2003	53114,3	27637,8	41852,2	115,0	122604,4
2004	51601,6	27741,6	42035,7	115,5	121378,9
2005	50574,9	28143,0	40558,9	111,5	119276,7
2006	49198,6	28395,9	40245,7	110,6	117840,2
2007	48265,8	29165,3	37484,6	103,0	114915,7
2008	39097,8	27192,3	40875,4	112,4	107165,5
2009	39832,8	30170,7	41483,0	114,0	111486,5
2010	39496,4	29279,8	41810,8	114,9	110587,0
2011	35555,0	30719,9	44657,7	122,7	110932,6
2012	37350,0	32710,2	37268,5	102,4	107328,7
2013	34388,6	31466,4	40936,9	112,5	106791,9
2014	32082,4	32105,3	46066,9	126,6	110254,6
2015	29947,8	32395,0	45863,6	126,1	108206,4
2016	25548,1	32198,2	47662,6	131,0	105409,0
2017	19052,1	31130,7	56086,3	154,2	106269,2
2018	20690,6	31726,2	60414,1	166,1	112830,9
2019	18473,6	37796,7	51465,6	141,5	107735,9
2020	19908,1	38173,6	50494,9	138,8	108576,6
2021	16825,6	38082,5	52748,9	145,0	107657,0
2022	15226,2	38696,8	52204,8	143,5	106127,8

[74]

48. La base de datos utilizada para los cálculos está disponible en la hoja de cálculo titulada "Huella de Carbono CARC (1960 -2022)", accesible mediante el siguiente enlace: https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1QRm_stlMnt5T1NRygkZWJNUtg_T8_Vn0

Anexo 4. Huella Ecológica del cultivo de Caña de azúcar en la CARC

4.1 Secuestro de Carbono, fuente: Cálculos propios

Año	Área cultivada (ha)	Secuestro de carbono tonCO2/año (mín. factor de absorción)	Secuestro de carbono tonCO2/año (máx. factor de absorción)	Tasas de g (iguales en ambos casos)
1960	62	23	2.587.200	
1961	63	24	2.625.798	1,5%
1962	64	24	2.679.054	2,0%
1963	64	24	2.672.712	-0,2%
1964	64	24	2.696.442	0,9%
1965	70	27	2.955.246	9,6%
1966	79	30	3.305.694	11,9%
1967	82	31	3.458.070	4,6%
1968	86	33	3.614.100	4,5%
1969	92	35	3.853.290	6,6%
1970	92	35	3.863.244	0,3%
1971	98	37	4.114.320	6,5%
1972	102	39	4.294.500	4,4%
1973	114	43	4.778.214	11,3%
1974	116	44	4.883.172	2,2%
1975	118	45	4.974.900	1,9%
1976	113	43	4.734.576	-4,8%
1977	128	48	5.371.338	13,4%
1978	133	50	5.570.040	3,7%
1979	130	49	5.468.400	-1,8%
1980	133	50	5.593.854	2,3%
1981	132	50	5.531.862	-1,1%
1982	134	51	5.640.642	2,0%
1983	138	52	5.792.262	2,7%
1984	139	53	5.819.814	0,5%
1985	132	50	5.525.394	-5,1%
1986	139	53	5.841.864	5,7%
1987	137	52	5.769.036	-1,2%
1988	139	53	5.821.536	0,9%
1989	145	55	6.104.406	4,9%
1990	152	58	6.401.934	4,9%
1991	160	61	6.732.222	5,2%
1992	165	63	6.939.492	3,1%
1993	179	68	7.498.428	8,1%
1994	181	69	7.604.646	1,4%
1995	182	69	7.639.506	0,5%
1996	184	70	7.729.638	1,2%
1997	193	73	8.097.306	4,8%
1998	196	74	8.243.592	1,8%
1999	197	75	8.288.826	0,5%
2000	194	74	8.147.832	-1,7%
2001	190	72	7.972.062	-2,2%
2002	206	78	8.633.310	8,3%
2003	198	75	8.317.596	-3,7%
2004	197	75	8.274.546	-0,5%
2005	198	75	8.318.058	0,5%
2006	198	75	8.315.748	0,0%
2007	203	77	8.522.892	2,5%
2008	206	78	8.637.888	1,3%
2009	208	79	8.746.668	1,3%
2010	218	83	9.169.062	4,8%
2011	224	85	9.404.010	2,6%
2012	228	86	9.565.416	1,7%
2013	226	85	9.473.520	-1,0%
2014	230	87	9.672.726	2,1%
2015	232	88	9.746.940	0,8%
2016	238	90	10.004.568	2,6%
2017	243	92	10.215.744	2,1%
2018	248	94	10.411.170	1,9%
2019	262	99	11.019.288	5,8%
2020	263	100	11.053.140	0,3%
2021	263	100	11.064.270	0,1%
2022	265	100	11.135.796	0,6%

4.2 Huella de Carbono Neta, fuente: Cálculos propios

Año	Mínimo Secuestro de carbono tonCO ₂ eq	Máximo Secuestro de carbono tonCO ₂ eq	Huella de Carbono (ton. co ₂ eq)	Mínimo HCN (ton. co ₂ eq)	Máximo HCN (ton. co ₂ eq)
1960	23	2.587.200	16.534,4	- 6.812,0	- 2.570.665,6
1961	24	2.625.798	16.478,3	- 7.216,4	- 2.609.319,7
1962	24	2.679.054	17.707,0	- 6.468,3	- 2.661.347,0
1963	24	2.672.712	17.494,7	- 6.623,4	- 2.655.217,3
1964	24	2.696.442	18.356,0	- 5.976,2	- 2.678.086,0
1965	27	2.955.246	20.407,4	- 6.260,1	- 2.934.838,6
1966	30	3.305.694	22.622,2	- 7.207,8	- 3.283.071,8
1967	31	3.458.070	23.961,7	- 7.243,2	- 3.434.108,3
1968	33	3.614.100	25.696,1	- 6.916,9	- 3.588.403,9
1969	35	3.853.290	27.190,0	- 7.581,4	- 3.826.100,0
1970	35	3.863.244	26.851,0	- 8.010,2	- 3.836.393,0
1971	37	4.114.320	30.308,7	- 6.818,1	- 4.084.011,3
1972	39	4.294.500	31.329,3	- 7.423,5	- 4.263.170,7
1973	43	4.778.214	56.145,5	13.027,8	- 4.722.068,5
1974	44	4.883.172	58.538,6	14.473,8	- 4.824.633,4
1975	45	4.974.900	61.686,4	16.793,9	- 4.913.213,6
1976	43	4.734.576	57.053,5	14.329,6	- 4.677.522,5
1977	48	5.371.338	61.305,5	12.835,6	- 5.310.032,5
1978	50	5.570.040	67.227,2	16.964,2	- 5.502.812,8
1979	49	5.468.400	69.343,3	19.997,5	- 5.399.056,7
1980	50	5.593.854	72.889,1	22.411,2	- 5.520.964,9
1981	50	5.531.862	71.349,1	21.430,6	- 5.460.512,9
1982	51	5.640.642	73.719,3	22.819,2	- 5.566.922,7
1983	52	5.792.262	77.006,3	24.738,0	- 5.715.255,7
1984	53	5.819.814	72.855,9	20.339,0	- 5.746.958,1
1985	50	5.525.394	73.318,4	23.458,3	- 5.452.075,6
1986	53	5.841.864	76.071,2	23.355,3	- 5.765.792,8
1987	52	5.769.036	76.242,6	24.183,9	- 5.692.793,4
1988	53	5.821.536	78.794,0	26.261,5	- 5.742.742,0
1989	55	6.104.406	82.530,3	27.445,3	- 6.021.875,7
1990	58	6.401.934	84.930,7	27.160,9	- 6.317.003,3
1991	61	6.732.222	87.545,2	26.794,9	- 6.644.676,8
1992	63	6.939.492	90.821,3	28.200,6	- 6.848.670,7
1993	68	7.498.428	96.185,3	28.521,0	- 7.402.242,7
1994	69	7.604.646	99.466,1	30.843,2	- 7.505.179,9
1995	69	7.639.506	103.785,2	34.847,7	- 7.535.720,8
1996	70	7.729.638	106.699,2	36.948,4	- 7.622.938,8
1997	73	8.097.306	106.864,1	33.795,6	- 7.990.441,9
1998	74	8.243.592	108.899,8	34.511,2	- 8.134.692,2
1999	75	8.288.826	109.854,5	35.057,8	- 8.178.971,5
2000	74	8.147.832	112.131,1	38.606,6	- 8.035.700,9
2001	72	7.972.062	105.709,3	33.770,9	- 7.866.352,7
2002	78	8.633.310	123.185,9	45.280,6	- 8.510.124,1
2003	75	8.317.596	122.604,4	47.548,0	- 8.194.991,6
2004	75	8.274.546	121.378,9	46.711,0	- 8.153.167,1
2005	75	8.318.058	119.276,7	44.216,2	- 8.198.781,3
2006	75	8.315.748	117.840,2	42.800,4	- 8.197.907,8
2007	77	8.522.892	114.915,7	38.006,7	- 8.407.976,3
2008	78	8.637.888	107.165,5	29.218,9	- 8.530.722,5
2009	79	8.746.668	111.486,5	32.558,2	- 8.635.181,5
2010	83	9.169.062	110.587,0	27.847,2	- 9.058.475,0
2011	85	9.404.010	110.932,6	26.072,6	- 9.293.077,4
2012	86	9.565.416	107.328,7	21.012,2	- 9.458.087,3
2013	85	9.473.520	106.791,9	21.304,6	- 9.366.728,1
2014	87	9.672.726	110.254,6	22.969,7	- 9.562.471,4
2015	88	9.746.940	108.206,4	20.251,9	- 9.638.733,6
2016	90	10.004.568	105.409,0	15.129,7	- 9.899.159,0
2017	92	10.215.744	106.269,2	14.084,3	- 10.109.474,8
2018	94	10.411.170	112.830,9	18.882,4	- 10.298.339,1
2019	99	11.019.288	107.735,9	8.299,9	- 10.911.552,1
2020	100	11.053.140	108.576,6	8.835,2	- 10.944.563,4
2021	100	11.064.270	107.657,0	7.815,2	- 10.956.613,0
2022	100	11.135.796	106.127,8	5.640,5	- 11.029.668,2

4.3 Huella ecológica, fuente: Cálculos propios

Año	HCN (ton. co2eq)	Bosque primario HE (ha)	Bosque intermedio HE (ha)	Cultivo de caña HE (ha)
1960	-7	- 113,5	-272,48	-17.973,52
1961	-7	- 120,3	-288,66	-19.040,72
1962	-6	- 107,8	-258,73	-17.066,71
1963	-7	- 110,4	-264,93	-17.475,88
1964	-6	- 99,6	-239,05	-15.768,29
1965	-6	- 104,3	-250,41	-16.517,54
1966	-7	- 120,1	-288,31	-19.017,85
1967	-7	- 120,7	-289,73	-19.111,46
1968	-7	- 115,3	-276,67	-18.250,33
1969	-8	- 126,4	-303,25	-20.003,63
1970	-8	- 133,5	-320,41	-21.134,96
1971	-7	- 113,6	-272,73	-17.989,78
1972	-7	- 123,7	-296,94	-19.586,98
1973	13	217,1	521,11	34.374,17
1974	14	241,2	578,95	38.189,38
1975	17	279,9	671,76	44.311,03
1976	14	238,8	573,18	37.808,93
1977	13	213,9	513,42	33.866,91
1978	17	282,7	678,57	44.760,50
1979	20	333,3	799,90	52.763,80
1980	22	373,5	896,45	59.132,52
1981	21	357,2	857,23	56.545,21
1982	23	380,3	912,77	60.209,01
1983	25	412,3	989,52	65.271,90
1984	20	339,0	813,56	53.664,88
1985	23	391,0	938,33	61.895,21
1986	23	389,3	934,21	61.623,54
1987	24	403,1	967,36	63.809,89
1988	26	437,7	1050,46	69.291,61
1989	27	457,4	1097,81	72.415,13
1990	27	452,7	1086,43	71.664,56
1991	27	446,6	1071,80	70.699,05
1992	28	470,0	1128,03	74.408,04
1993	29	475,3	1140,84	75.253,18
1994	31	514,1	1233,73	81.380,55
1995	35	580,8	1393,91	91.946,48
1996	37	615,8	1477,94	97.489,17
1997	34	563,3	1351,82	89.170,33
1998	35	575,2	1380,45	91.058,45
1999	35	584,3	1402,31	92.500,68
2000	39	643,4	1544,26	101.864,39
2001	34	562,8	1350,84	89.105,37
2002	45	754,7	1811,22	119.473,84
2003	48	792,5	1901,92	125.456,37
2004	47	778,5	1868,44	123.248,03
2005	44	736,9	1768,65	116.665,38
2006	43	713,3	1712,02	112.929,95
2007	38	633,4	1520,27	100.281,55
2008	29	487,0	1168,75	77.094,65
2009	33	542,6	1302,33	85.905,54
2010	28	464,1	1113,89	73.475,40
2011	26	434,5	1042,91	68.793,21
2012	21	350,2	840,49	55.441,28
2013	21	355,1	852,19	56.212,79
2014	23	382,8	918,79	60.606,20
2015	20	337,5	810,08	53.435,08
2016	15	252,2	605,19	39.919,93
2017	14	234,7	563,37	37.161,64
2018	19	314,7	755,30	49.821,74
2019	8	138,3	332,00	21.899,56
2020	9	147,3	353,41	23.311,85
2021	8	130,3	312,61	20.620,47
2022	6	94,0	225,62	14.882,70

[77]

Nota: Se prescindió del cálculo de la HCN con el factor de absorción máximo porque este, al suponer una capacidad de absorción tan grande, no deja posibilidad de calcular Huella Ecológica en términos de territorio necesario para absorber las emisiones netas, dado que estas son negativas.

Autores

Mario Alejandro Pérez-Rincón, PhD.

Profesor Titular Universidad del Valle – Facultad de Ingeniería -
Instituto CINARA

Katherine Mosquera Víquez

Ingeniera Agrícola, Universidad del Valle

Isabella Puente Prado

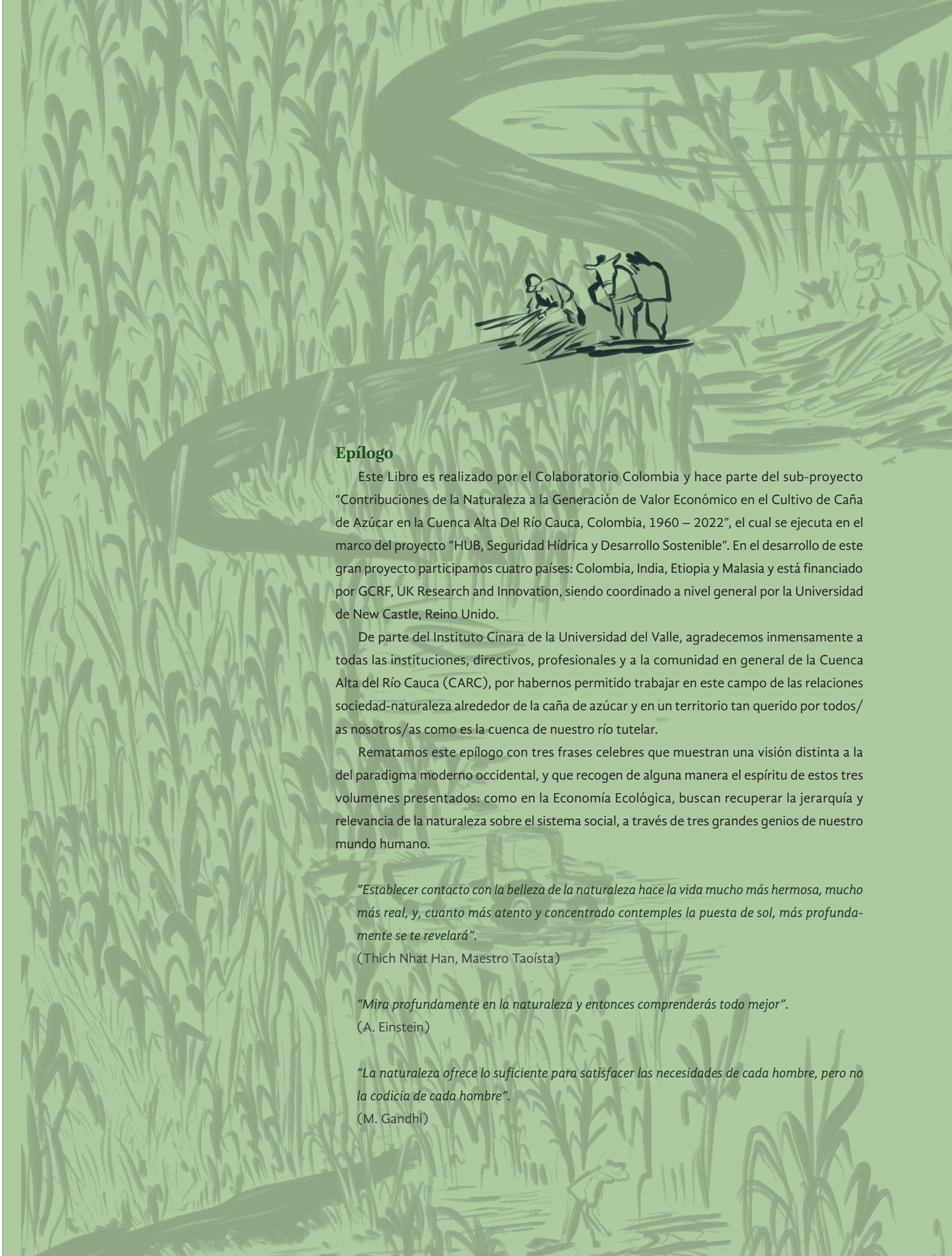
Economista, Universidad del Valle

Daniel Andrés Mosquera

Economista, MSc, Universidad del Cauca, Universidad del Valle

Yinneth Andrea Molina Macías

Economista, Universidad del Valle



Epílogo

Este Libro es realizado por el Colaboratorio Colombia y hace parte del sub-proyecto “Contribuciones de la Naturaleza a la Generación de Valor Económico en el Cultivo de Caña de Azúcar en la Cuenca Alta Del Río Cauca, Colombia, 1960 – 2022”, el cual se ejecuta en el marco del proyecto “HUB, Seguridad Hídrica y Desarrollo Sostenible”. En el desarrollo de este gran proyecto participamos cuatro países: Colombia, India, Etiopía y Malasia y está financiado por GCRF, UK Research and Innovation, siendo coordinado a nivel general por la Universidad de New Castle, Reino Unido.

De parte del Instituto Cinara de la Universidad del Valle, agradecemos inmensamente a todas las instituciones, directivos, profesionales y a la comunidad en general de la Cuenca Alta del Río Cauca (CARC), por habernos permitido trabajar en este campo de las relaciones sociedad-naturaleza alrededor de la caña de azúcar y en un territorio tan querido por todos/as nosotros/as como es la cuenca de nuestro río tutelar.

Rematamos este epílogo con tres frases celebres que muestran una visión distinta a la del paradigma moderno occidental, y que recogen de alguna manera el espíritu de estos tres volúmenes presentados: como en la Economía Ecológica, buscan recuperar la jerarquía y relevancia de la naturaleza sobre el sistema social, a través de tres grandes genios de nuestro mundo humano.

“Establecer contacto con la belleza de la naturaleza hace la vida mucho más hermosa, mucho más real, y, cuanto más atento y concentrado contemples la puesta de sol, más profundamente se te revelará”.

(Thich Nhat Han, Maestro Taoísta)

“Mira profundamente en la naturaleza y entonces comprenderás todo mejor”.

(A. Einstein)

“La naturaleza ofrece lo suficiente para satisfacer las necesidades de cada hombre, pero no la codicia de cada hombre”.

(M. Gandhi)