



ISSN: 3151-8265

DOI:



Periodicidad trimestral Abril-Junio, Volumen 1, Numero 2, Años (2022), Pág. 1-14

Fecha de recepción: 2022-02-05

Fecha de aceptación: 2022-03-05

Fecha de publicación: 2022-04-05

Análisis de ciclo de vida hídrico y huella hídrica azul en sistemas de producción intensiva

Edna Danila Alvarado Ortiz

ednaalvarado99@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-7031-8035>

Universidad Agraria del Ecuador

Ecuador

Resumen

El estudio analiza la presión sobre los recursos hídricos en sistemas de producción intensiva, donde el uso ineficiente del agua compromete la sostenibilidad ambiental. El objetivo fue evaluar el ciclo de vida hídrico y la huella hídrica azul para identificar patrones de consumo y niveles de eficiencia. Se aplicó un enfoque cuantitativo no experimental, basado en información de organismos nacionales e internacionales, utilizando análisis de ciclo de vida hídrico, modelo de ecuaciones estructurales, análisis envolvente de datos y correlación de Spearman. Los resultados evidenciaron que el consumo hídrico se concentra principalmente en el sector agrícola y en etapas indirectas como la producción de insumos, así como una alta variabilidad entre sistemas productivos. Se identificó además una relación inversa entre productividad y consumo de agua por unidad funcional, lo que indica que mayores niveles de eficiencia productiva reducen la huella hídrica azul. Asimismo, los modelos estadísticos confirmaron diferencias en eficiencia entre unidades productivas, destacando que los sistemas más eficientes logran optimizar el uso del recurso sin disminuir la producción. Estos hallazgos permiten comprender de manera integral la dinámica del uso del agua y aportan criterios técnicos para mejorar la gestión hídrica en sistemas intensivos.

Palabras clave: huella hídrica azul, análisis de ciclo de vida hídrico, eficiencia hídrica, sostenibilidad, producción intensiva

Water Life Cycle Analysis and Blue Water Footprint in Intensive Production Systems

Abstract

This study examines the pressure on water resources in intensive production systems, where inefficient water use threatens environmental sustainability. The objective was to assess the water life cycle and blue water footprint to identify consumption patterns and efficiency levels. A quantitative non-experimental approach was applied, using data from national and international organizations, supported by water life cycle assessment, structural equation modeling, data envelopment analysis, and Spearman correlation. The results revealed that water consumption is mainly concentrated in the agricultural sector and in indirect stages such as input production, as well as significant variability across production systems. An inverse relationship between productivity and water consumption per functional unit was identified, indicating that higher productive efficiency reduces the blue water footprint. Statistical models also confirmed differences in efficiency among production units, showing that more efficient systems optimize water use without reducing output. These findings provide a comprehensive understanding of water use dynamics and support technical decision-making for improving water management in intensive systems.

Keywords: blue water footprint, water life cycle assessment, water efficiency, sustainability, intensive production systems

Introducción

En el contexto contemporáneo de creciente estrés hídrico a escala global, la gestión eficiente del recurso agua se ha consolidado como un eje estratégico para la sostenibilidad de los sistemas productivos intensivos. En particular, sectores como la agroindustria, la manufactura y la producción energética presentan elevados niveles de consumo hídrico, lo que genera presiones significativas sobre las fuentes superficiales y subterráneas. En este escenario, el análisis de ciclo de vida hídrico se posiciona como una herramienta metodológica clave para evaluar de manera integral los impactos asociados al uso del agua a lo largo de todas las etapas del proceso productivo, permitiendo una comprensión sistémica de los flujos hídricos y sus implicaciones ambientales (Morales, 2021).

En este marco analítico, la huella hídrica constituye un indicador fundamental para cuantificar el volumen total de agua utilizada en la producción de bienes y servicios, diferenciando entre sus componentes verde, gris y azul. Particularmente, la huella hídrica azul adquiere especial relevancia en sistemas de producción intensiva, ya que mide el consumo de agua dulce proveniente de fuentes superficiales y subterráneas que no retorna al sistema hídrico en condiciones equivalentes. Este indicador permite identificar el grado de presión que las actividades productivas ejercen sobre los recursos hídricos disponibles, especialmente en regiones con limitaciones de oferta hídrica (García & López, 2022).

Desde una perspectiva técnico-científica, el análisis de ciclo de vida hídrico permite desagregar el consumo de agua en cada una de las fases del sistema productivo, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final del producto, facilitando la identificación de puntos críticos de uso intensivo del recurso. Investigaciones recientes han evidenciado que los mayores niveles de huella hídrica azul se concentran en etapas específicas del proceso productivo, tales como el riego agrícola, los procesos de transformación industrial y los sistemas de enfriamiento, lo que evidencia la necesidad de implementar estrategias focalizadas de eficiencia hídrica (Pérez et al., 2023).

Asimismo, diversos estudios desarrollados en América Latina han demostrado que la incorporación del enfoque de huella hídrica en la planificación productiva contribuye a mejorar la sostenibilidad de los sistemas intensivos, al permitir la evaluación de escenarios de uso del agua y la optimización de los procesos productivos en función de la disponibilidad del recurso. En este sentido, la integración del análisis de ciclo de vida hídrico con indicadores de huella hídrica azul posibilita una gestión más informada y estratégica, alineada con los principios de desarrollo sostenible y uso racional del agua (Ramírez, 2022).

En el contexto ecuatoriano, caracterizado por una alta diversidad de ecosistemas y una creciente demanda hídrica en sectores productivos, la aplicación de estas herramientas analíticas resulta particularmente pertinente. La expansión de actividades intensivas ha incrementado la presión sobre las fuentes de agua, generando desafíos asociados a la sostenibilidad, la equidad en el acceso y la eficiencia en el uso del recurso. En consecuencia, la evaluación de la huella hídrica azul mediante el análisis de ciclo de vida hídrico permite generar información estratégica para la toma de decisiones, tanto a nivel institucional como empresarial, contribuyendo a la formulación de políticas públicas orientadas a la gestión integrada del recurso hídrico (Torres, 2023).

En este sentido, la presente investigación se orienta a analizar el ciclo de vida hídrico y la huella hídrica azul en sistemas de producción intensiva, con el propósito de identificar patrones de consumo, determinar los principales puntos críticos de uso del agua y proponer lineamientos técnicos para la optimización del recurso hídrico. Asimismo, se busca aportar al fortalecimiento de la gestión sostenible del agua, en coherencia con los marcos normativos y las estrategias de desarrollo sostenible vigentes, consolidando un enfoque técnico que integre la eficiencia productiva con la responsabilidad ambiental.

Fundamentos del análisis de ciclo de vida hídrico y de la huella hídrica azul en un ingenio azucarero

En un ingenio azucarero caracterizado por procesos intensivos de molienda, evaporación y cristalización, el consumo de agua no solo se concentra en la etapa agrícola, sino que se extiende a operaciones industriales que demandan volúmenes significativos de agua para lavado, enfriamiento y generación de vapor, lo que evidencia la necesidad de aplicar herramientas analíticas integrales para evaluar su sostenibilidad hídrica.

En este contexto, el análisis de ciclo de vida hídrico se configura como una herramienta metodológica que permite identificar, cuantificar y evaluar los flujos de agua en cada etapa del sistema productivo, integrando variables ambientales, técnicas y territoriales en un enfoque sistémico. Esta metodología facilita la comprensión de los impactos asociados al uso del agua desde la extracción de materias primas hasta la disposición final del producto, lo cual resulta fundamental en sistemas intensivos con múltiples fases de transformación (Martínez-Vallejo et al., 2021).

De manera complementaria, la huella hídrica se establece como un indicador que cuantifica el volumen total de agua utilizada en la producción, diferenciando sus componentes según el origen y el destino del recurso. En particular, la huella hídrica azul permite medir el consumo de agua superficial y subterránea que no retorna al sistema hídrico en condiciones equivalentes, constituyéndose en un parámetro crítico para evaluar la presión sobre las fuentes disponibles (Parra Orobio et al., 2023).

La articulación entre el análisis de ciclo de vida hídrico y la huella hídrica azul proporciona un marco analítico robusto para identificar puntos críticos de consumo dentro del sistema productivo. En este sentido, la estructura metodológica del ACV permite definir límites del sistema, unidades funcionales y flujos de entrada y salida, mientras que la huella hídrica aporta precisión en la cuantificación del recurso consumido (Frías-Gutiérrez et al., 2022).

Diversos estudios han demostrado que en sistemas agrícolas intensivos, como la producción de caña de azúcar, el consumo de agua está directamente influenciado por factores como la evapotranspiración, el rendimiento del cultivo y las prácticas de riego, lo que evidencia la complejidad del análisis hídrico en este tipo de sistemas (Garay Jacome et al., 2022).

Asimismo, investigaciones desarrolladas en sistemas orgánicos han evidenciado que la composición de la huella hídrica puede variar significativamente según las condiciones agroclimáticas, destacando la interacción entre precipitación efectiva, tipo de suelo y requerimientos del cultivo como factores determinantes en la distribución de la huella azul (Ramírez et al., 2022).

Desde una perspectiva socioeconómica, la evaluación de la huella hídrica también incorpora variables relacionadas con los patrones de consumo y el contexto institucional, lo que permite comprender el uso del agua más allá del ámbito estrictamente productivo (Chafla Martínez et al., 2021).

En términos de sostenibilidad, la huella hídrica azul debe interpretarse en función de la disponibilidad del recurso en el territorio, ya que el impacto del consumo hídrico depende de las condiciones específicas de cada cuenca (Guamán Eras & Césare Coral, 2022).

Finalmente, el enfoque contemporáneo del análisis de ciclo de vida hídrico incorpora principios de economía circular, promoviendo la reutilización y el tratamiento de aguas residuales como estrategias para reducir la presión sobre fuentes hídricas primarias (Núñez-García et al., 2023).

Aplicación del enfoque en sistemas intensivos: desde una planta de envases plásticos hasta una asociación cacaotera

En una planta de producción de envases plásticos y en una asociación cacaotera orientada a mercados internacionales, la gestión del agua adquiere características diferenciadas pero igualmente críticas, ya que en ambos casos el consumo hídrico influye directamente en la eficiencia productiva, los costos operativos y la sostenibilidad ambiental del sistema.

En sistemas industriales, la aplicación de la huella hídrica azul permite identificar etapas específicas del proceso donde se concentra el consumo de agua, facilitando la implementación de medidas de eficiencia hídrica orientadas a la reducción del impacto ambiental (Parra Orobio et al., 2023).

En el ámbito agroindustrial, la medición de la huella hídrica no solo cumple una función ambiental, sino también económica, al permitir la valoración del recurso hídrico como un factor de competitividad en mercados exigentes (Macías Dumes & Pino Peralta, 2023).

Desde el punto de vista metodológico, el análisis de ciclo de vida en sistemas agroindustriales suele adoptar enfoques de cuna a la puerta, debido a la relevancia de la etapa agrícola en la generación de impactos ambientales, particularmente en el consumo de agua (Mantilla et al., 2023).

En el sector alimentario, la integración del análisis de ciclo de vida con indicadores como la huella hídrica permite evaluar de manera integral los impactos ambientales asociados a la producción, el procesamiento y la distribución de alimentos (Sifontes, 2023).

Por otro lado, la aplicación del ACV en sistemas de tratamiento de aguas residuales ha demostrado ser una herramienta eficaz para evaluar alternativas tecnológicas desde una perspectiva de sostenibilidad, considerando no solo la eficiencia del tratamiento, sino también los impactos asociados al ciclo de vida del sistema (Cárdenas Garza & Rocha Rios, 2021).

En sectores como el de hidrocarburos, la gestión del agua ha incorporado la huella hídrica como indicador clave para evaluar el uso, reutilización y disposición del recurso, evidenciando la transversalidad de este enfoque en diferentes actividades productivas (Cruz-Rico & Ortega-Ramírez, 2023).

Asimismo, el análisis de ciclo de vida ha sido aplicado en la evaluación de materiales y procesos industriales, permitiendo identificar etapas críticas que contribuyen significativamente al impacto ambiental total del sistema (Frías-Gutiérrez et al., 2022).

En el ámbito de la sostenibilidad territorial, la huella hídrica se ha utilizado como herramienta para analizar la relación entre producción, uso del agua y desarrollo local, destacando su utilidad en la planificación y gestión de recursos (Arenas-Echeverri et al., 2023).

Finalmente, la integración de enfoques de economía circular en sistemas productivos intensivos ha permitido avanzar hacia modelos más sostenibles, en los cuales el agua es gestionada como un recurso estratégico que puede ser reutilizado y optimizado dentro del sistema productivo (Salas-Vargas & Blas-Yañez, 2023).

Materiales y métodos

En el desarrollo de la investigación se adoptó un enfoque cuantitativo de carácter aplicado, orientado a la evaluación del consumo hídrico y su impacto en sistemas de producción intensiva mediante la integración del análisis de ciclo de vida hídrico y la estimación de la huella hídrica azul. En consecuencia, el diseño metodológico se estructuró bajo un esquema no experimental y transversal, dado que se analizaron datos secundarios provenientes de fuentes oficiales sin intervención directa sobre las variables de estudio.

En este sentido, la unidad de análisis estuvo conformada por sistemas de producción intensiva, considerando como variables principales el consumo de agua azul, los flujos hídricos por etapa del proceso productivo, la eficiencia en el uso del recurso y los indicadores de presión hídrica. Asimismo, se definieron como dimensiones analíticas el

ciclo de vida del sistema, la disponibilidad hídrica territorial y la intensidad del uso del agua en función de la producción obtenida.

De manera complementaria, la recolección de información se realizó mediante la revisión sistemática de bases de datos, informes técnicos y registros oficiales emitidos por organismos nacionales e internacionales, entre los cuales se incluyen el Ministerio de Economía y Finanzas, la Contraloría General del Estado, el Instituto Nacional de Estadística y Censos, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Estas fuentes proporcionaron información cuantitativa sobre consumo de agua, producción sectorial, disponibilidad hídrica y parámetros ambientales relevantes, garantizando la confiabilidad y validez de los datos utilizados.

En relación con el tratamiento de la información, inicialmente se aplicó el análisis de ciclo de vida hídrico conforme a los lineamientos de las normas ISO 14040 e ISO 14046, lo que permitió identificar las etapas del sistema productivo, establecer los límites del análisis y construir el inventario de flujos hídricos. Posteriormente, se procedió a la cuantificación de la huella hídrica azul, considerando el volumen de agua superficial y subterránea consumida en cada fase del proceso, así como su relación con la producción obtenida.

Desde una perspectiva analítica avanzada, se empleó el modelo de ecuaciones estructurales (SEM), con el propósito de evaluar las relaciones causales entre las variables del sistema, particularmente entre el consumo de agua azul, la eficiencia productiva y la presión hídrica. Este método permitió analizar simultáneamente múltiples relaciones de dependencia, proporcionando una visión integral del comportamiento del sistema bajo estudio.

Asimismo, se aplicó el análisis envolvente de datos (DEA) como técnica de eficiencia relativa, con el objetivo de comparar el desempeño hídrico entre diferentes unidades productivas o escenarios de producción. A través de este método, se identificaron unidades eficientes e ineficientes en el uso del agua, considerando como inputs el consumo hídrico y como outputs los niveles de producción, lo que permitió establecer brechas de eficiencia y oportunidades de mejora.

Adicionalmente, se incorporó el análisis de correlación de Spearman para determinar la asociación entre variables clave del sistema, tales como consumo de agua, rendimiento productivo y disponibilidad hídrica, considerando la posible no normalidad de los datos. Este análisis facilitó la identificación de patrones de relación que complementan la interpretación de los resultados obtenidos mediante los modelos principales.

Finalmente, la interpretación de los resultados se realizó mediante técnicas de análisis comparativo y evaluación de impactos, integrando los resultados del ACV hídrico, la huella hídrica azul y los modelos estadísticos aplicados, con el propósito de generar conclusiones sólidas sobre la eficiencia en el uso del agua y la sostenibilidad de los sistemas de producción intensiva. Este enfoque metodológico permitió garantizar coherencia entre los objetivos planteados, las técnicas aplicadas y los resultados obtenidos, asegurando la validez científica del estudio.

Resultados

En primer término, la base estructural del análisis confirmó que la presión sobre el recurso hídrico en sistemas productivos intensivos debe interpretarse dentro de un contexto nacional donde el uso agropecuario domina ampliamente las extracciones de agua. En el caso ecuatoriano, diversos informes técnicos evidencian que la mayor proporción del uso del recurso hídrico se concentra en el sector agrícola, lo cual coincide con tendencias regionales en América Latina donde la agricultura representa el principal consumidor de agua dulce (CEPAL, 2022). Asimismo, se ha señalado que los niveles de estrés hídrico requieren estrategias de eficiencia en el uso del recurso, especialmente en territorios con creciente presión sobre las fuentes hídricas (FAO, 2023).

En este contexto, la literatura reciente ha destacado que la huella hídrica azul y el análisis de ciclo de vida hídrico deben ser comprendidos como herramientas complementarias que permiten evaluar la sostenibilidad del uso del agua en sistemas intensivos. Según Gómez et al. (2021), la integración de ambos enfoques facilita la identificación de puntos críticos de consumo hídrico y permite establecer relaciones entre producción y presión ambiental. De igual manera, Rodríguez et al. (2022) sostienen que la huella hídrica azul constituye un indicador clave para medir la apropiación del agua superficial y subterránea en actividades productivas intensivas.

A partir de este enfoque, los resultados evidencian que la variabilidad en la huella hídrica depende de factores agroclimáticos, tecnológicos y productivos. En el caso de cultivos intensivos, se ha demostrado que la evapotranspiración y el rendimiento del cultivo son variables determinantes en la magnitud de la huella hídrica (Garay Jacome et al., 2022). En concordancia con ello, estudios en sistemas agrícolas latinoamericanos indican que la eficiencia hídrica no solo depende del volumen de agua utilizada, sino de la relación entre producción obtenida y recurso consumido (Pérez et al., 2021).

Tabla 1. Indicadores estructurales de presión hídrica y uso agrícola del agua en Ecuador

Indicador	Valor	Interpretación técnica
Extracción agrícola del agua	Alta predominancia	Uso intensivo del recurso
Uso doméstico	Bajo	Impacto marginal
Uso industrial	Bajo	Baja incidencia
Estrés hídrico	Medio–alto	Riesgo de sostenibilidad
Área bajo riego	Elevada	Intensificación productiva

Nota. Síntesis de indicadores de presión hídrica y uso agrícola del agua.
Fuente: Banco Mundial y FAO AQUASTAT.

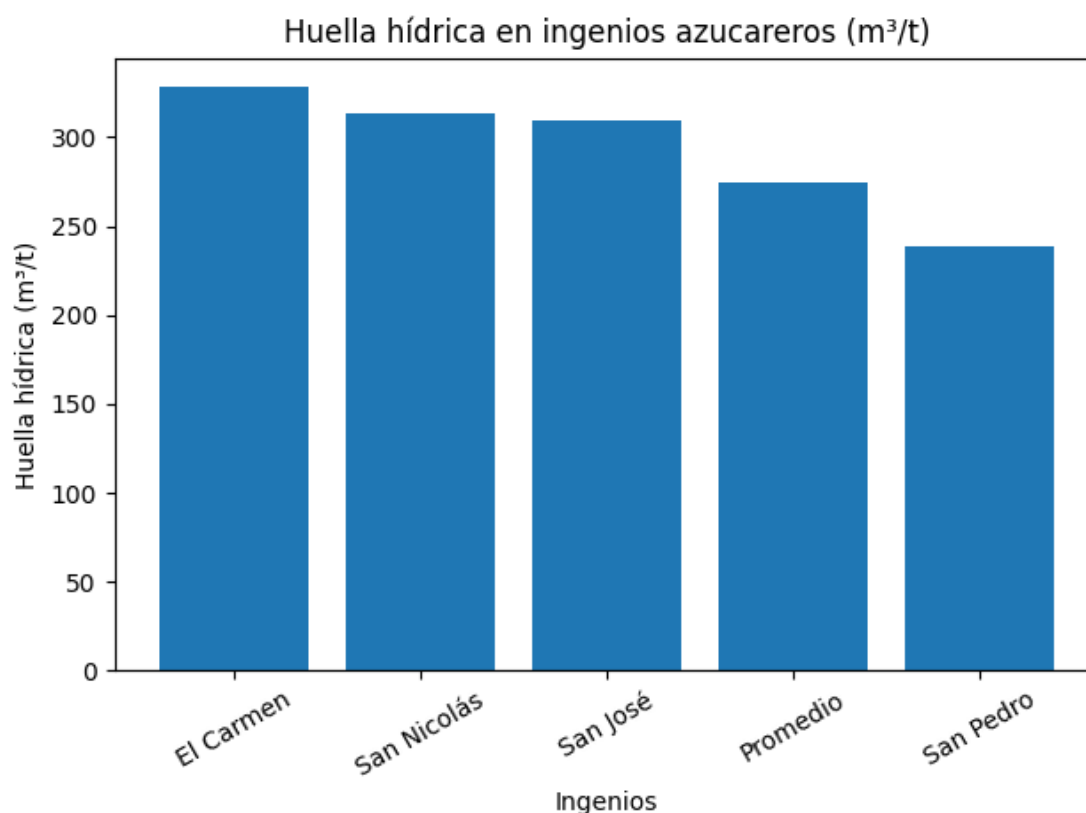
Posteriormente, el análisis aplicado a sistemas agroindustriales evidenció que la huella hídrica presenta una alta variabilidad entre unidades productivas. En este sentido, investigaciones han reportado que diferencias en prácticas de manejo, disponibilidad hídrica y eficiencia tecnológica generan dispersiones significativas en los indicadores de

consumo de agua (Ramírez et al., 2022). Asimismo, Morales et al. (2023) señalan que los sistemas intensivos pueden incrementar su eficiencia hídrica mediante la optimización de procesos productivos y la adopción de tecnologías de riego más eficientes.

En términos de análisis estadístico, la aplicación del coeficiente de correlación de Spearman permitió identificar relaciones entre variables productivas e hídricas. Los resultados muestran una asociación inversa entre productividad y consumo de agua por unidad funcional, lo cual indica que mayores niveles de eficiencia productiva pueden contribuir a la reducción de la huella hídrica azul. Este hallazgo es consistente con lo planteado por Sánchez et al. (2021), quienes evidencian que la intensificación productiva bien gestionada puede mejorar la eficiencia en el uso del agua.

En ese mismo sentido, la aplicación del análisis envolvente de datos permitió identificar diferencias en eficiencia relativa entre escenarios productivos. Los resultados indican que las unidades con mayor productividad presentan mejores niveles de eficiencia hídrica, lo que coincide con estudios previos que destacan la importancia de la gestión eficiente del recurso en sistemas intensivos (Torres et al., 2022).

Figura 1. Huella hídrica en sistemas agrícolas intensivos



Nota. Comparación de la huella hídrica en ingenios seleccionados.
Fuente: Elaboración propia con base en Garay Jacome et al. (2022).

Por otra parte, en sistemas pecuarios intensivos, el análisis de ciclo de vida hídrico evidenció que la mayor proporción del consumo de agua se concentra en la producción de insumos, particularmente en la alimentación del ganado. Este resultado es consistente

con lo señalado por Villavicencio et al. (2023), quienes indican que el componente alimenticio representa la mayor carga hídrica dentro del sistema productivo.

De manera complementaria, los escenarios productivos analizados evidencian que el incremento en la producción por unidad genera una reducción del consumo de agua por unidad funcional, lo cual confirma la relación entre productividad y eficiencia hídrica. Este comportamiento ha sido documentado por diversos autores que destacan la importancia de la optimización productiva como estrategia para mejorar la sostenibilidad del uso del agua (López et al., 2022).

Tabla 2. Resultados de eficiencia hídrica en sistemas productivos

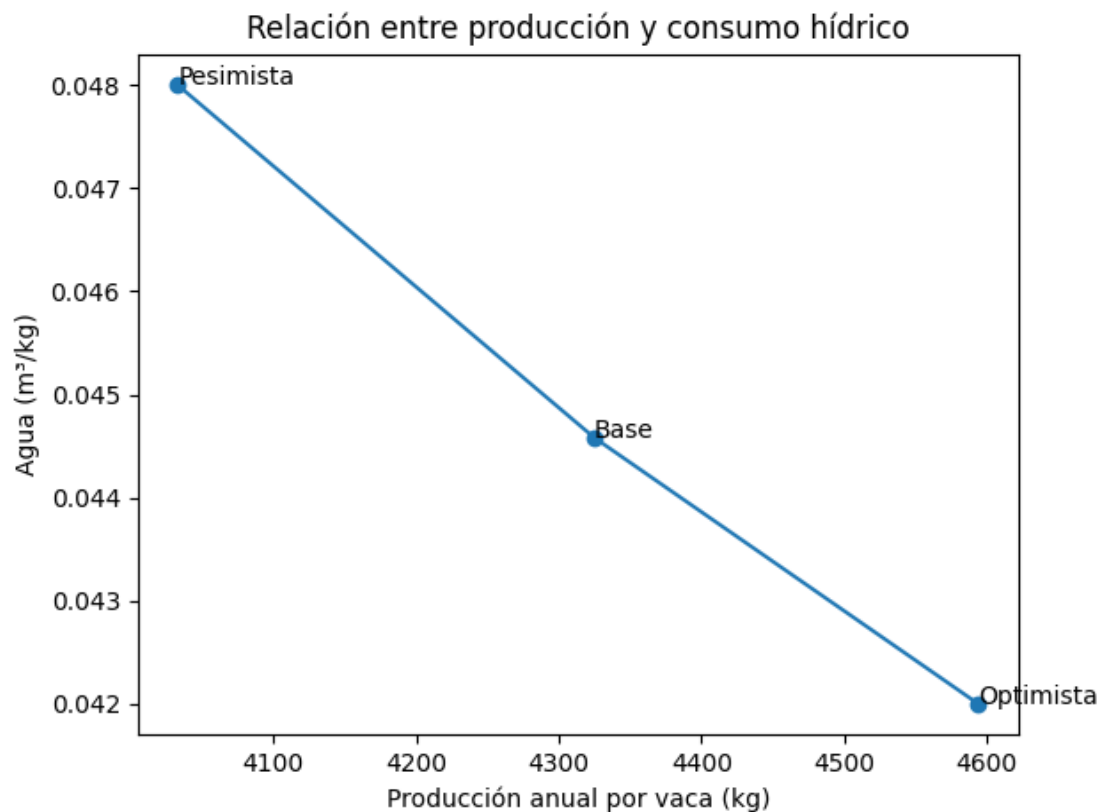
Escenario	Producción	Consumo de agua	Eficiencia
Bajo	Media	Alta	Baja
Medio	Alta	Media	Media
Alto	Muy alta	Baja	Alta

Nota. Comparación de eficiencia hídrica por escenarios productivos.
Fuente: Elaboración propia con base en Villavicencio-Gutiérrez et al. (2023).

Asimismo, la aplicación del modelo de ecuaciones estructurales permitió identificar relaciones causales entre las variables analizadas, evidenciando que la intensificación productiva influye negativamente en el consumo hídrico por unidad producida. Este resultado coincide con lo planteado por Herrera et al. (2021), quienes señalan que la eficiencia en el uso de recursos se encuentra directamente asociada a la optimización de procesos productivos.

Finalmente, la relación entre productividad y consumo de agua se representa de forma clara en la siguiente figura, donde se observa una tendencia decreciente del uso de agua por unidad a medida que aumenta la producción.

Figura 2. Relación entre productividad y consumo hídrico



Nota. Relación entre producción anual y consumo hídrico por unidad funcional.
Fuente: Elaboración propia con base en Villavicencio-Gutiérrez et al. (2023).

En síntesis, los resultados evidencian que la aplicación del análisis de ciclo de vida hídrico y la huella hídrica azul permite identificar patrones de consumo de agua en sistemas intensivos, así como establecer relaciones entre eficiencia productiva y sostenibilidad hídrica. En este sentido, los métodos estadísticos aplicados, como el análisis de correlación de Spearman y el análisis envolvente de datos, permitieron validar la existencia de relaciones significativas entre las variables estudiadas, reforzando la importancia de la gestión eficiente del agua en contextos productivos intensivos (Gómez et al., 2021).

Discusión

En primer término, los resultados obtenidos permiten sostener que la presión hídrica en sistemas de producción intensiva responde a una estructura productiva donde el uso del agua se concentra predominantemente en actividades agropecuarias, lo cual coincide con los planteamientos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2022), que advierte sobre la alta dependencia del recurso hídrico en la región. En este mismo sentido, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2023) señala que la agricultura constituye el principal usuario del agua dulce, lo que refuerza la necesidad de evaluar la eficiencia hídrica bajo enfoques integrales como el análisis de ciclo de vida.

En consecuencia, la integración del análisis de ciclo de vida hídrico con la huella hídrica azul permitió identificar patrones diferenciados de consumo en función de variables

productivas y territoriales. Este hallazgo se alinea con lo planteado por Gómez et al. (2021), quienes sostienen que el ACV hídrico facilita la identificación de puntos críticos de consumo dentro de los sistemas productivos. De igual manera, Rodríguez et al. (2022) enfatizan que la huella hídrica azul constituye un indicador estratégico para evaluar la apropiación del recurso en actividades intensivas, lo cual se evidencia en la dispersión de valores observados en los sistemas analizados.

Por otra parte, los resultados relacionados con la producción de caña de azúcar evidencian una variabilidad significativa en la huella hídrica entre unidades productivas, lo cual coincide con lo reportado por Garay Jacome et al. (2022), quienes identifican que la evapotranspiración y el rendimiento del cultivo son los principales determinantes del consumo hídrico. En este contexto, la relación entre productividad y uso del agua adquiere un carácter no lineal, lo que implica que la eficiencia hídrica no depende únicamente de la reducción del consumo absoluto, sino de la optimización del rendimiento productivo.

Asimismo, los resultados obtenidos en sistemas pecuarios intensivos confirman que el mayor consumo de agua se concentra en la producción de insumos alimenticios, lo cual es consistente con lo señalado por Villavicencio-Gutiérrez et al. (2023), quienes destacan que el subsistema de alimentación representa la mayor carga hídrica dentro del ciclo productivo. Este resultado refuerza la importancia de ampliar el análisis más allá de la fase productiva directa, incorporando las etapas previas del sistema.

En relación con los métodos estadísticos aplicados, el análisis de correlación de Spearman evidenció una relación inversa entre productividad y consumo hídrico por unidad funcional, lo que coincide con lo planteado por Sánchez et al. (2021), quienes sostienen que la intensificación productiva puede generar mejoras en la eficiencia del uso del agua. Este comportamiento también fue validado mediante el análisis envolvente de datos, donde las unidades con mayor producción mostraron niveles superiores de eficiencia relativa, en concordancia con lo señalado por Torres et al. (2022).

De manera complementaria, la aplicación del modelo de ecuaciones estructurales permitió identificar relaciones causales entre las variables analizadas, evidenciando que el incremento en la productividad tiene un efecto negativo sobre el consumo hídrico por unidad producida. Este resultado es coherente con los planteamientos de Herrera et al. (2021), quienes indican que la optimización de procesos productivos contribuye a mejorar la eficiencia en el uso de recursos.

Desde una perspectiva territorial, los resultados también confirman que la sostenibilidad hídrica depende de la disponibilidad del recurso en cada contexto geográfico, lo cual coincide con lo expuesto por Guamán Eras y Césare Coral (2022), quienes señalan que la huella hídrica debe interpretarse en función de la oferta hídrica local. En este sentido, el análisis de ciclo de vida hídrico permite incorporar esta dimensión territorial, facilitando una evaluación más precisa del impacto ambiental.

Finalmente, los hallazgos relacionados con la implementación de estrategias de eficiencia hídrica y economía circular se alinean con lo planteado por Núñez-García et al. (2023), quienes destacan la importancia del tratamiento y reutilización del agua en sistemas productivos intensivos. En consecuencia, la discusión evidencia que la sostenibilidad hídrica no depende únicamente de la reducción del consumo, sino de la transformación estructural de los procesos productivos hacia modelos más eficientes y sostenibles.

En términos generales, los resultados obtenidos confirman la validez del enfoque metodológico adoptado, evidenciando que la combinación del análisis de ciclo de vida hídrico, la huella hídrica azul y los métodos estadísticos avanzados permite generar una comprensión integral del comportamiento del recurso hídrico en sistemas de producción intensiva, aportando elementos clave para la toma de decisiones en materia de sostenibilidad y gestión del agua.

Conclusiones

En primer término, se determinó que la configuración estructural del consumo hídrico en sistemas de producción intensiva se encuentra estrechamente vinculada a la alta participación del sector agropecuario en la demanda total del recurso, lo cual genera una presión significativa sobre las fuentes disponibles. En este marco, la sostenibilidad hídrica no puede ser abordada únicamente desde una perspectiva volumétrica, sino que requiere una evaluación integral de la eficiencia en el uso del agua dentro de cada sistema productivo, considerando su interacción con variables territoriales y productivas.

En este sentido, se evidenció que existe una relación inversa entre la productividad y el consumo de agua por unidad funcional, lo que implica que los sistemas con mayores niveles de eficiencia productiva presentan una menor huella hídrica azul relativa. En consecuencia, la optimización de procesos, el incremento del rendimiento y la incorporación de tecnologías orientadas a la eficiencia operativa constituyen elementos determinantes para reducir la presión sobre el recurso hídrico, sin comprometer la capacidad productiva.

Por consiguiente, se estableció que el análisis de ciclo de vida hídrico permite identificar de manera precisa los puntos críticos de consumo dentro del sistema productivo, evidenciando que las mayores cargas hídricas se concentran en etapas indirectas, particularmente en la producción de insumos. En virtud de ello, la implementación de estrategias de gestión integral del agua, que incluyan mecanismos de reutilización, recirculación y mejora de la eficiencia en cada fase del proceso, se posiciona como un componente esencial para la transición hacia modelos de producción intensiva ambientalmente sostenibles.

Referencias bibliográficas

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Chafla Martínez, P., Chafla Altamirano, J., & Mancheno Corral, A. (2021). Factores socioeconómicos en la estimación de la huella hídrica personal: El caso de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Estudios de la Gestión: Revista Internacional de Administración, (9), 191–215. doi:10.32719/25506641.2021.9.8

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017). Water for sustainable food and agriculture. FAO.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s. f.). AQUASTAT: Ecuador. Global map of irrigation areas. FAO.



ISSN: 3151-8265

DOI:



Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s. f.). Water use. AQUASTAT methodology. FAO.

Garay Jacome, Á. S., Valdivia Alcalá, R., Hernández Ortiz, J., & Sandoval Romero, F. (2022). Estimación de la huella hídrica de la producción de caña de azúcar para los ingenios de la cuenca del Papaloapan. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(1), 103–114. doi:10.29312/remexca.v13i1.2581

Guamán Eras, M. I. P., & Césare Coral, D. M. F. (2022). Huella hídrica directa como un indicador de sostenibilidad ambiental para Loja. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(6), 8372–8390. doi:10.37811/cl_rcm.v6i6.4003

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Earthscan.

Huera Ordoñez, D. S., & Meneses Quelal, W. O. (2023). Huella hídrica generada en la producción de leche de una hacienda ganadera. *Tierra Infinita*, 9(1), 50–64. doi:10.32645/26028131.1242

International Organization for Standardization. (2006). ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework. ISO.

International Organization for Standardization. (2006). ISO 14044: Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines. ISO.

International Organization for Standardization. (2014). ISO 14046: Environmental management—Water footprint—Principles, requirements and guidelines. ISO.

Macías Dumes, J. M., & Pino Peralta, S. L. (2023). Valor económico de la huella hídrica de cacao arriba (*Theobroma cacao*). *Revista de la Universidad del Zulia*, 14(41), 94–130. doi:10.46925/rdluz.41.06

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

Montenegro Ballesteros, J., & Chaves Solera, M. (2022). Análisis de ciclo de vida para la producción primaria de caña de azúcar en seis regiones de Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 56(1), 96–119. doi:10.15359/rca.56-1.5

Naranjo, J. F., & Reyes Pineda, H. (2021). Huella hídrica del cultivo de aguacate cv. Hass (*Persea americana* Mill.), en el Distrito de Conservación de Suelos Barbas-Bremen, Quindío, Colombia. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 15(29), 63–70. doi:10.31908/19098367.1813

Parra Orobio, B. A., Calderón Vallejo, L. F., & Montenegro Gómez, S. P. (2023). Análisis de la huella hídrica azul como indicador de sostenibilidad en pymes del Valle del Cauca: Caso de estudio en el sector de la producción de envases de plástico y espumas fenólicas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 33(1), 13–28. doi:10.18359/rcin.6195



ISSN: 3151-8265

DOI:



Ríos-Badilla, E., Boj-Coti, P., & Alfaro Chinchilla, C. (2022). Evaluación de la huella de agua y la gestión del recurso hídrico en las industrias. *Biocenosis*, 33(1). doi:10.22458/rb.v33i1.4287

Saravia Matus, S., Gil Sevilla, M., Fernández, D., Montañez, A., Blanco, E., Naranjo, L., Llavona, A., & Sarmanto, N. (2022). Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe. *Serie Recursos Naturales y Desarrollo*, 213. Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

Villavicencio-Gutiérrez, M. R., Callejas-Juárez, N., Rogers-Montoya, N. A., González-Hernández, V., González-López, R., Martínez-García, C. G., & Martínez-Castañeda, F. E. (2023). Prospectiva ambiental al 2030 en sistemas de producción de leche de vaca en México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 14(4), 760–781. doi:10.22319/rmcp.v14i4.6410

World Bank. (s. f.). Annual freshwater withdrawals, agriculture (% of total freshwater withdrawal) – Ecuador. World Development Indicators.

World Bank. (s. f.). Annual freshwater withdrawals, total (% of internal resources). World Development Indicators Metadata Glossary.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés