

REVISTA CÁTEDRA DEL AGUA

SOSTENIBILIDAD HÍDRICA

Uso de la huella hídrica como herramienta de apoyo a la gestión integral de los recursos hídricos.





cta
Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia

**Cátedra
del Agua**

REVISTA CÁTEDRA DEL AGUA

Número 08 - Año 2014

Elaborado por:
Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia – CTA
Línea de Agua y Medio Ambiente

Autores:
Diego Arévalo Uribe, Claudia Patricia Campuzano Ochoa, Andrea
Carolina Guzmán Cabrera, Carolina María Rodríguez Ortíz,
Diana Rojas Orjuela, Juan Esteban González Valencia,
Erika Zárate, Sebastián Ospina Valencia, Verónica Valencia,
Luis Javier Montoya

Comité Editorial:
Santiago Echavarría Escobar
Claudia Patricia Campuzano Ochoa
Juan Camilo Múnera Estrada
Gabriel Alfonso Betancur Pérez

Fotografías de la carátula:
Cortesía equipo técnico CTA
Raphael Linzatti

Primera edición:
ISSN 1909-9363
Medellín, 2014

Área de Comunicaciones
Marisol Delgado Sánchez.
Jonathan Estepa Hernández.

Impresión
Impresos Begón Ltda.
Impreso en Colombia

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la
reproducción total de esta publicación, sin la autorización
expresa del Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia–CTA.
Para la reproducción parcial debe citarse la fuente.

CONTENIDO

	Presentación	1
1	PRINCIPALES RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN COLOMBIA EN EL MARCO DEL ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA-ENA 2014 Diego Arévalo, Claudia Campuzano, Andrea Guzmán, Carolina Rodríguez, Diana Rojas	5
2	LA HUELLA HÍDRICA AZUL MULTISECTORIAL EN COLOMBIA Juan González, Diego Arévalo, Claudia Campuzano	13
3	EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE LA HUELLA HÍDRICA VERDE EN COLOMBIA Carolina Rodríguez, Erika Zárate	25
4	PROYECCIONES DE FLUJOS DE AGUA VIRTUAL DE SIETE PRODUCTOS AGRÍCOLAS DE COLOMBIA 2013-2022: UNA APLICACIÓN DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS Y LA ECONOMÍA COMPLEJA Andrea Guzmán, Sebastián Opina	37
5	CUANTIFICACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA POR LA MINERÍA DE MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN, EN LA CUENCA DEL RÍO PORCE (COLOMBIA). Verónica Valencia, Luis Montoya, Juan González	51

PRESENTACIÓN

La huella hídrica es una medida de la apropiación del agua por parte del ser humano. Puede ser calculada para una persona, un proceso, un producto, una empresa, un sector económico o un lugar geográfico. Mediante la evaluación de la huella hídrica es posible obtener información acerca de los impactos y la dependencia de este recurso, así como las medidas que se pueden tomar para un uso eficiente, equitativo y sostenible en el tiempo.

El análisis de los tres componentes de la huella hídrica (verde, azul y gris) permite identificar las fuentes del consumo de agua: precipitación, agua superficial y subterránea, y el volumen requerido para la asimilación de los contaminantes, a lo largo de la cadena de producción. Tanto para una persona, como para las empresas y entidades a cargo del recurso hídrico es importante conocer cuáles son sus consumos directos e indirectos y los riesgos que representa su sobreutilización, con el fin de desarrollar un plan para su gestión estratégica.

Para garantizar un uso sostenible del agua, el consumo no puede exceder la disponibilidad de este recurso. Es importante anotar que en el cálculo del consumo deben incluirse los requerimientos del componente biótico de los ecosistemas naturales, por ejemplo, el uso de agua para el crecimiento de la vegetación. Si esto no se tiene en cuenta, resultarían afectados los servicios ecosistémicos necesarios para garantizar el bienestar y la calidad de vida de la población. De manera similar, debe analizarse la cantidad de agua requerida para asimilar la contaminación, y en caso de no ser suficiente, estaría en riesgo la salud de la población y de los ecosistemas.

Los artículos publicados en este número contribuyen al conocimiento de la aplicación de la huella hídrica en Colombia e invitan a la reflexión sobre este concepto. Surgen preguntas relacionadas con las políticas de comercio internacional de productos agrícolas, tales como cuáles son aquellos cultivos que ejercen mayor presión sobre el recurso hídrico y cómo podemos hacer que su producción sea más eficiente.

La inclusión de la huella hídrica como indicador en el Estudio Nacional del Agua 2014 es un gran avance en la gestión del recurso hídrico. La identificación de los sectores de la economía nacional que tienen mayor consumo de agua, así como de las subregiones hidrográficas que están en estado crítico o de alerta por su capacidad de abastecer la demanda, es sin duda una herramienta muy útil para la toma de decisiones por parte de los entes territoriales y las corporaciones autónomas territoriales.

Finalmente, es importante incentivar el cálculo de la huella hídrica, de la misma manera que se calcula la huella de carbono, tanto de las personas como de las empresas. Esto generará una mayor conciencia hacia el uso racional del agua y motivará el diseño de estrategias que pendan por su sostenibilidad.

María del Pilar Arroyave Maya
Docente Universidad Escuela de Ingeniería de Antioquia

1

**PRINCIPALES
RESULTADOS DE LA
ESTIMACIÓN DE LA
HUELLA HÍDRICA EN
COLOMBIA EN EL
MARCO DEL ESTUDIO
NACIONAL DEL
AGUA-ENA 2014**

PRINCIPALES RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN COLOMBIA EN EL MARCO DEL ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA-ENA 2014

Autores:

- **Diego Arévalo.**
Good Stuff Internacional Latinoamérica y el Caribe
diego.arevalo.uribe@gmail.com
- **Claudia Campuzano.**
Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia-CTA
ccampuzano@cta.org.co
- **Andrea Guzmán.**
Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia-CTA
aguzman@cta.org.co
- **Carolina Rodríguez.**
Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia-CTA
crodriguez@cta.org.co
- **Diana Rojas.**
Embajada de Suiza, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación-Cosude
diana.rojas@eda.admin.ch

RESUMEN

Los recursos hídricos en Colombia aunque son muy abundantes no están equitativamente distribuidos. Las regiones con menor oferta de agua concentran a la mayor población y las respectivas actividades económicas. Esto genera presiones sobre los recursos disponibles, evidenciando la necesidad de enfrentar y adelantarse a los conflictos de uso mediante la gestión integrada del recurso hídrico. En la región Magdalena – Cauca, la segunda con menor disponibilidad de agua en Colombia, soporta mayor presión por el uso del agua, allí se concentran las principales ciudades (Bogotá y Medellín), los principales conglomerados industriales, el 70 % de los embalses para la generación de energía y abastecimiento doméstico y las principales actividades agrícolas. La huella hídrica como herramienta de apoyo a la gestión integral del recurso hídrico, se incorporó por primera vez en un instrumento de política pública como es el Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2015). Se estimó la huella hídrica azul y verde para el 2014 a nivel de 316 cuencas hidrográficas, para cinco sectores económicos: agropecuario, doméstico, industrial, energético y la extracción de petróleo. Se calcularon los índices de escasez de agua azul y agua verde y se realizó un análisis de flujos de agua virtual para los seis principales cultivos de exportación. Los avances en este tema han permitido analizar el comercio del agua en términos de agua exportada, las ventajas comparativas que presenta el país y las subzonas con mayor presión en relación al comercio exterior de los principales productos agrícolas exportables.

Palabras claves: huella hídrica, subzonas hidrográficas, política pública, gestión integrada del recurso hídrico.

ABSTRACT

Water Resources in Colombia are abundant although not evenly distributed. Regions with lower water supply, concentrate most population and the respective economic activities. This causes pressures on available resources, highlighting the need to address and anticipate conflicts of use through Integrated Water Resource Management. The region of Magdalena – Cauca has less water available in Colombia, and the largest Pressures Water Use supported. Major cities (Bogotá and Medellín) are concentrated major industrial conglomerates, 70 % of the dams for power generation and domestic supplies and the main agricultural activities. As water footprint support tool Integrated Water Resource Management, it joined for the first time an instrument of public policy: the National Water Study (IDEAM, 2015). The blue and green water footprint was estimated for 316 watersheds, paragraph five economic sectors: agriculture, domestic, industrial, energy and oil extraction. This study includes rates are Scarcity of Water Blue and Green. Moreover the Virtual Water Flow Analysis for six major export crops was made. Progress in this issue have allowed analyze the water trade in terms of water exported, comparative advantages of the country and the subareas with higher pressure in relation to foreign trade of major agricultural products export.

Key words: water footprint, water footprint blue, water footprint green, virtual water flow, National Water Study-ENA, watershed.

INTRODUCCIÓN

Colombia está ubicada al norte de Suramérica. Cuenta con 1.600 kilómetros de costa en el Mar Caribe y 1.300 kilómetros en el Océano Pacífico. El país tiene una extensión de 114 millones de hectáreas; político-administrativamente se divide en: 32 departamentos, 1.122 municipios y un distrito capital; hidrológicamente, se divide en cinco áreas hidrográficas: Caribe, Amazonas, Orinoco, Magdalena-Cauca y Pacífico, las cuales a su vez se dividen en 316 subzonas hidrográficas, 311 continentales y cinco insulares. Existen cerca de cinco millones de hectáreas agrícolas y 40 millones de pastos para ganadería (Ministerio de Agricultura, 2013a, 2013b). Las áreas protegidas en el país suman 16 millones de hectáreas, mientras que los páramos suman tres millones hectáreas. El país se encuentra en el primer lugar de biodiversidad en el mundo (SibColombia, 2015) y en el sexto lugar en total de recursos hídricos (FAO, 2015). Sin embargo, está enfrentando diferentes desafíos: el 70 % de su población se concentra en el área hidrográfica Magdalena-Cauca, la cual cuenta con el 13 % del recurso hídrico disponible y en donde la contaminación es el principal limitante en la disponibilidad de agua. Así mismo, el país ha estado caracterizado en los últimos años por una alta tasa de deforestación, estimada en 147.946 hectáreas al año (IDEAM, 2013), desafíos a los que se le une el cambio climático, que según los escenarios planteados para Colombia, se estima que la escorrentía superficial podría reducirse hasta un 30 % en las áreas con mayor demanda del recurso.

METODOLOGÍA

El IDEAM cada cuatro años realiza la publicación del "Estudio Nacional del Agua - ENA", en donde da cuenta del estado y dinámica de los recursos hídricos en Colombia. En el 2014 este estudio incorporó el concepto de huella hídrica y se generaron dos indicadores nuevos, ampliando el panorama del conocimiento del recurso hídrico nacional. El ENA 2014, se consolidó como el primer estudio nacional del agua dirigido por una entidad pública en incorporar este indicador para la evaluación de su recurso hídrico. Este es resultado del trabajo conjunto del IDEAM, la Agencia Suiza para la Cooperación (COSUDE), el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA) y Good Stuff International para Latino América y El Caribe (GSI-LAC).

En este estudio, la huella hídrica en Colombia se evaluó a partir de la metodología de la Red Mundial de Huella Hídrica (Water Footprint Network, Hoekstra, et al., 2011), para cinco sectores económicos: agropecuario, doméstico, industrial, energía y extracción de petróleo, además se evaluó la huella hídrica generada en los trasvases de agua, en 316 subzonas hidrográficas; de las cuales cinco son insulares. Se calcularon los índices de escasez de agua azul y verde, los cuales fueron denominados Índice de Agua No Retornada a la Cuenca (IARC), que relaciona la huella hídrica azul con la disponibilidad de agua azul u oferta hídrica y el Índice de Presión Hídrica a los Ecosistemas (IPHE), que permite identificar en qué cuencas hidrográficas se presenta una competencia por el agua verde entre las actividades agropecuarias y las áreas de protección.

El estudio contempló además las proyecciones al 2022 del comportamiento de las huellas hídricas de los principales productos agrícolas del país y de los flujos de agua virtual de los principales cultivos de exportación. Esta información permite establecer los impactos futuros de las políticas de comercio exterior sobre el agua nacional y más importante, sobre la disponibilidad de agua regional.

PRINCIPALES RESULTADOS

En este apartado se presentan los principales resultados de la cuantificación de la huella hídrica azul y verde por sector económico, la evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica estimada, las proyecciones agrícolas y los flujos de agua virtual.

Cuantificación de la Huella Hídrica

En Colombia, la oferta hídrica nacional es de aproximadamente 2,4 millones de m³, de los cuales el 52 % corresponde a agua verde¹ y el 48 % restante a agua azul². La huella hídrica azul para los sectores analizados en Colombia es cercana a los 10.000 millones de m³, en donde el sector agropecuario aporta el 70 %, los trasvases el 22 % y el 8 % restante se distribuye entre el resto de los sectores económicos, mientras que la huella hídrica verde está cercana a los 300.000 millones de m³ al año, en donde este mismo sector aporta el 100 % (Figura 1).

En el caso del sector agrícola, los análisis se basaron en la priorización de 21 cultivos permanentes, 18 cultivos transitorios y dos categorías de pasto: corte y forraje. En este sector la huella hídrica verde es ocho veces mayor que la huella hídrica azul, estimada cerca de los 7.000 millones de m³ al año, indicando un importante uso de agricultura en seco.

¹ Agua proveniente de la lluvia, almacenada como humedad en el suelo.

² Agua superficial y subterránea.

Tal como sucede con el cultivo del café, el cual abarca la mayor área agrícola sembrada del país (cerca de un millón de hectáreas) y tiene una huella hídrica azul nula (no se riega), pero presenta la huella hídrica verde más alta del sector (11.822 millones de m³/año).

Para el sector pecuario se calculó la huella hídrica verde en tres categorías de pasto asociados a la ganadería extensiva: pastos manejados, naturales y sistemas silvopastoriles. Estos pastos en Colombia no utilizan riego y solamente generan huella hídrica cuando son destinados a la alimentación del ganado para fines de producción de leche o carne. Se tuvieron en cuenta cerca de 37 millones de hectáreas de pastos y alrededor de 24 millones de cabezas de ganado. Se obtuvo una huella hídrica verde cercana a los 246 mil millones de m³ al año.

En el caso del sector industrial, se encontró una huella hídrica azul de 65 millones de m³ al año. Este valor es solo para una muestra representativa de industrias, para las cuales fue posible la obtención de información, por lo tanto se considera este resultado como parcial y como un primer acercamiento a este sector, el cual podría ser detallado en el futuro.

Para el sector energético se tuvo en cuenta la generación hidroeléctrica concentrada en 22 embalses y la generación termoeléctrica en 66 centrales. La huella hídrica azul en este sector fue de 297 millones de m³ al año, concentrada en un 70 % en la región Magdalena-Cauca. Del total de esta huella hídrica, el 96 % corresponde a la generación hidroeléctrica. Además, se identificaron siete trasvases de agua entre cuencas, las cuales presentan una huella hídrica azul de 2.200 millones de m³ al año.

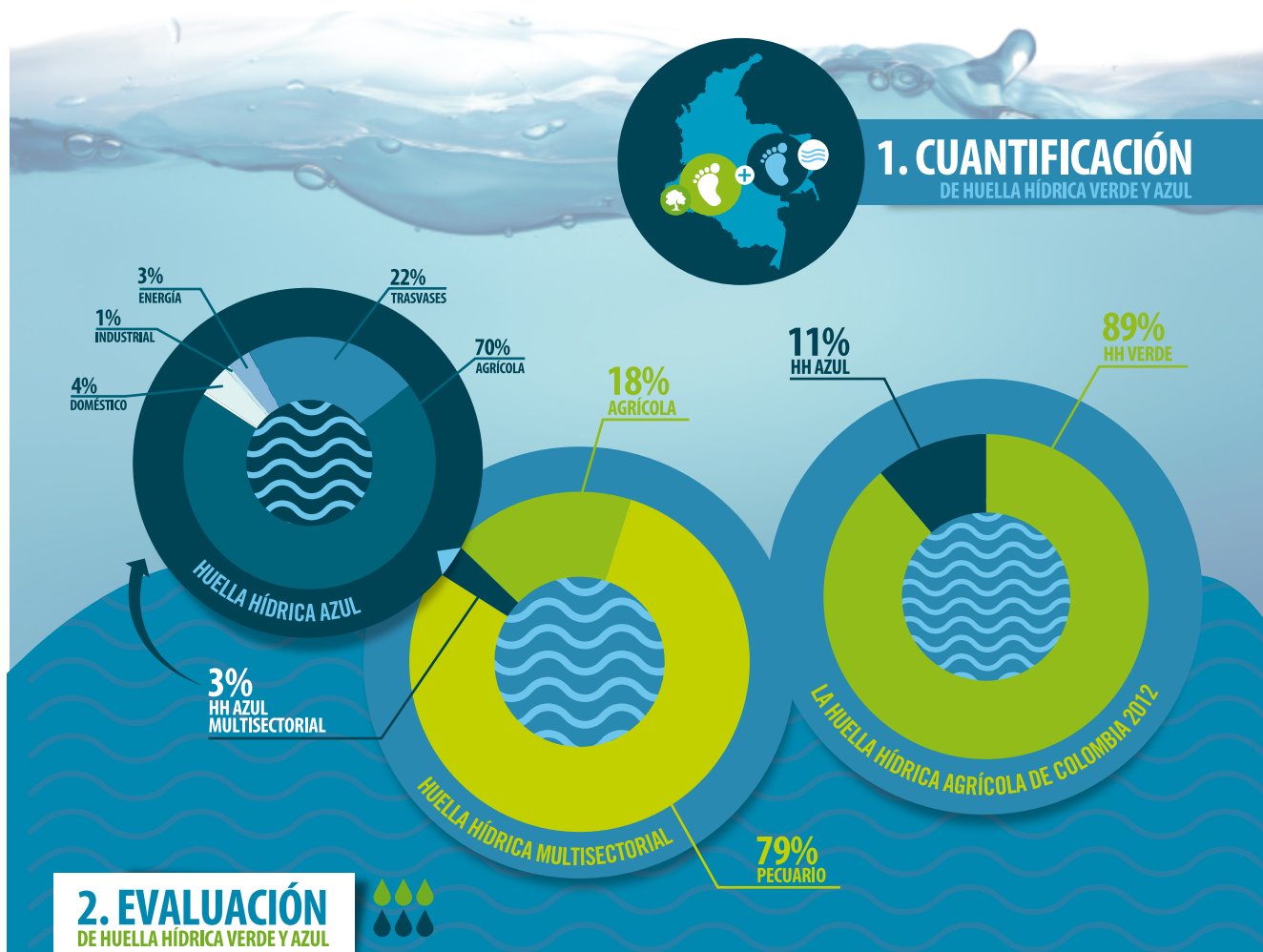


Figura 1. Cuantificación de la huella hídrica verde y azul.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso del sector minero específicamente en la extracción de petróleo, se encontró una huella hídrica azul de 6,6 millones de m³. Este valor se halló solamente para 392 campos de extracción de petróleo en 19 departamentos de Colombia, 66% de la huella hídrica calculada se concentró en los departamentos de Meta y Casanare. Otros subsectores asociados con la minería no fueron incluidos, debido a la poca o inexistente información. Esto pone a este sector como uno de los puntos focales con los cuales es altamente pertinente continuar explorando la aplicación de la huella hídrica.

Finalmente, en el caso del sector doméstico, se encontró una huella hídrica azul de 386 millones de m³ al año; en donde sobresalen las subzonas hidrográficas que contienen las dos principales ciudades del país (Bogotá y Medellín). Entre estas dos subzonas se aporta el 24 % de la huella hídrica azul en esta componente.

Evaluación de sostenibilidad de la huella hídrica estimada para Colombia

A nivel nacional la disponibilidad de agua azul es aproximadamente 100 veces superior a la huella hídrica azul. No obstante, a escala de subzona hidrográfica, se encuentran cuatro cuencas en estado crítico, es decir, en donde se presenta una alta competencia hídrica y potenciales conflictos por el uso entre las diferentes actividades económicas. Estas cuencas se localizan en el Caribe colombiano, entre los departamentos de Bolívar y Atlántico, en donde prevalecen algunos cultivos intensivos y la ganadería. En cuanto al agua verde, el análisis a nivel nacional permite estimar una disponibilidad de agua cuatro veces superior a la huella hídrica verde. Sin embargo, existen 22 subzonas hidrográficas críticas en donde es clara una competencia entre el sector agropecuario y las áreas protegidas del país; debido a la presión que existe sobre las áreas protegidas declaradas por la ampliación de la frontera agrícola y pecuaria.

Proyecciones agrícolas y de huella hídrica para Colombia. Flujos de agua virtual (2012 – 2022)

El modelo de dinámica de sistemas del comercio internacional para el aceite de palma, azúcar, banano, plátano, cacao, café y las flores y follajes, muestra en general un incremento de las exportaciones hacia el año 2022, lo que implica un aumento en general del flujo de agua virtual tanto verde como azul hacia el exterior a través de estos productos (Figura 2).

Este flujo de agua virtual al 2022, se caracteriza por ser en su mayoría agua virtual verde (93 % del total). Debido a esto, Colombia posee una ventaja comparativa en términos del uso del recurso hídrico en la producción de estos siete bienes agrícolas.

RESULTADOS CLAVE

- Como resultado del trabajo realizado durante cinco años, fue posible involucrar el indicador de huella hídrica a nivel de política pública, pasando de ser un concepto de estudios académicos y con aplicación empresarial a ser un insumo para la toma de decisiones a nivel de las instituciones públicas del país.
- La aplicación de la metodología de evaluación de huella hídrica a nivel de subzona hidrográfica para Colombia, permitió relacionar el uso del agua verde con los impactos sobre los ecosistemas y las áreas de conservación empleando el IPHE.
- Este estudio permitió conocer que Colombia tiene una ventaja comparativa como país agrícola exportador frente a otros países dado que su agricultura se basa principalmente en el agua verde.

CONCLUSIONES

En Colombia se tiene la suficiente cantidad de agua para satisfacer los requerimientos de los sectores económicos analizados y de la población, sin embargo a nivel de subzona hidrográfica pueden encontrarse condiciones críticas, identificadas a través de los indicadores IARC e IPHE, los cuales evalúan la sostenibilidad del agua azul y verde con respecto a la disponibilidad del recurso.

Es así como para el agua azul se identificaron cuatro subzonas hidrográficas insostenibles, debido a que presentan una crítica competencia entre la cantidad de agua azul disponible y las actividades productivas que en ellas se presentan. Así mismo, en el país se identificaron 22 subzonas hidrográficas con un nivel crítico en el IPHE, indicando una presión sobre los ecosistemas estratégicos, dada principalmente por la ampliación de la frontera agropecuaria.

Hay una clara tendencia a la especialización en algunos cultivos como la caña de azúcar, palma de aceite y cacao hacia el 2022, un fenómeno condicionado por los diferentes tratados de libre comercio y jalonado por la demanda energética de biocombustibles y por las cadenas productivas promocionadas desde la política pública nacional.

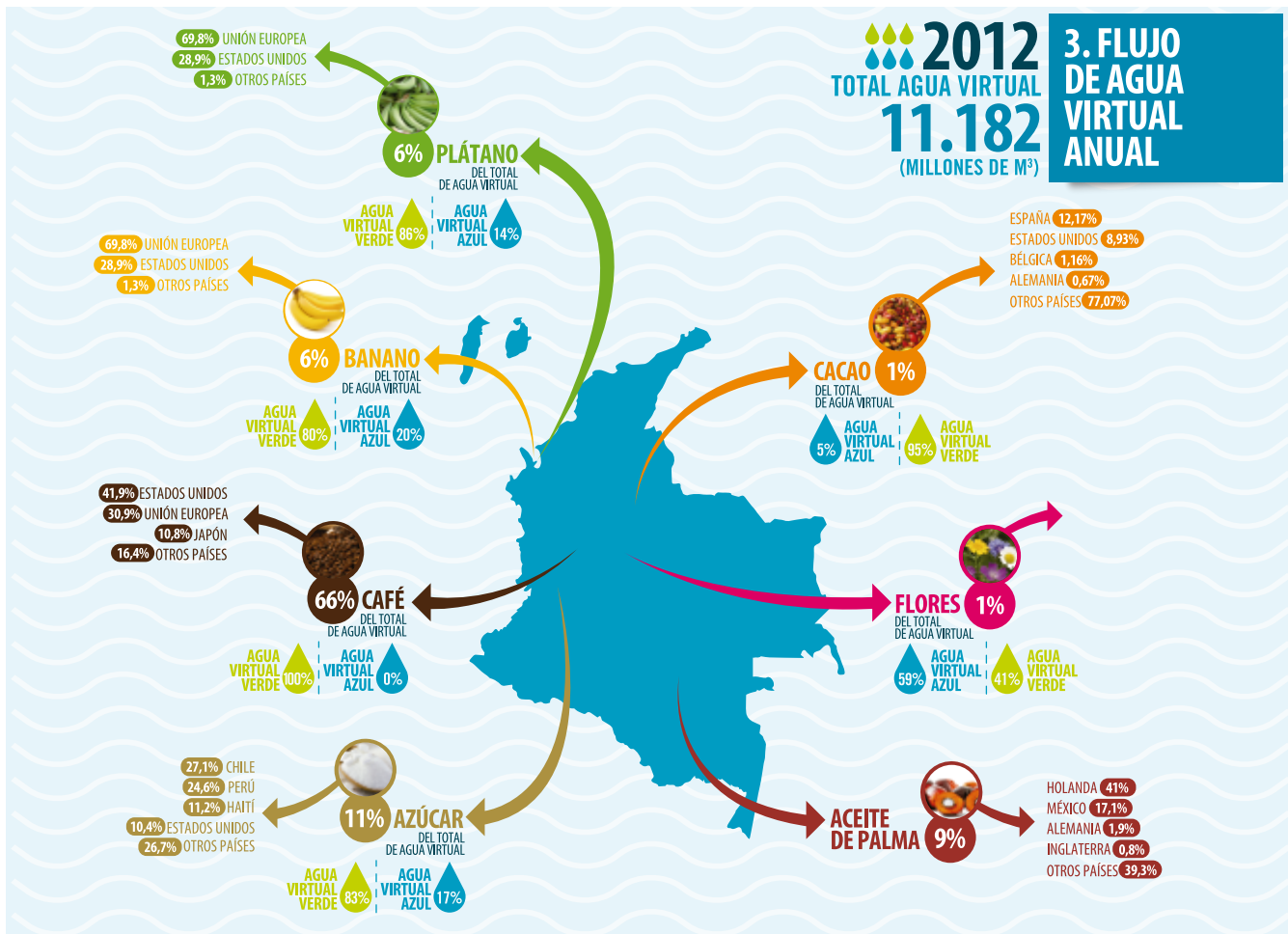


Figura 2. Flujos de agua virtual de las exportaciones agrícolas de Colombia

Fuente: Elaboración propia.

Estos productos, al igual que otros como el plátano, banano y flores, hacen parte de la oferta exportable del país, por lo cual se consideró un análisis de flujos de agua virtual, el cual permitió visibilizar y entender cómo una demanda externa genera un impacto sobre la oferta de agua local.

RECOMENDACIONES

- Promover mecanismos orientados a incrementar la productividad del agua verde y optimizar el uso del agua azul, por medio de la implementación de políticas públicas, direccionadas a aumentar la eficiencia en el uso del agua verde para el sector agropecuario (agricultura de secano).
- Analizar el fenómeno de ampliación de la frontera agropecuaria en aquellas zonas donde se identificó competencia entre áreas destinadas a actividades económicas y áreas de conservación.

- Revisar las políticas de incentivos económicos para cultivos como la palma de aceite y la caña de azúcar y definir un límite claro de crecimiento para estos sectores, basados en los requerimientos hídricos para otros sectores o actividades tales como el consumo doméstico y el agua requerida para el mantenimiento de los ecosistemas.

- Promover el indicador de huella hídrica como insumo para la orientación de los procesos futuros de ordenamiento del territorio, con el fin de redistribuir los impactos sobre el recurso hídrico y los ecosistemas.

- En el país existen cuencas hidrográficas sin áreas protegidas declaradas, representando un riesgo para la oferta hídrica y los servicios ecosistémicos. Se sugiere iniciar procesos de declaratoria en el corto plazo.

- Promover la visibilización del agua contenida en los productos exportables, a través de los análisis de agua virtual, para dar cuenta de los impactos regionales y locales del uso del recurso hídrico.

BIBLIOGRAFÍA

FAO. (2015). Aquastat. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Retrieved from <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/indexesp.stm>

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The Water Footprint Assessment Manual. Febrero 2011. Earthscan. <http://doi.org/978-1-84971-279-8>

IDEAM (2013). Comunicado de prensa del Centro de Prensa Internacional. http://wsp.presidencia.gov.co/cepri/noticias/2013/agosto/Paginas/20130805_05.aspx

IDEAM. (2015). Estudio Nacional del Agua - ENA.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia. (2013a). Evaluaciones Agropecuarias Municipales - EVA. Bogotá.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia. (2013b). Inventario Pecuario Municipal. Bogotá.

SibColombia. (2015). Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. Retrieved from <http://www.sibcolombia.net/web/sib/home>.
Ministerio de Agricultura (2013b)

2

**LA HUELLA
HÍDRICA AZUL
MULTISECTORIAL
EN COLOMBIA**

LA HUELLA HÍDRICA AZUL MULTISECTORIAL EN COLOMBIA

Autores:

- **Juan González.**
Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia-CTA
juangp83@yahoo.com.mx
 - **Diego Arévalo.**
Good Stuff Internacional Latinoamérica y el Caribe
diego.arevalo.uribe@gmail.com
 - **Claudia Campuzano.**
Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia-CTA
ccampuzano@cta.org.co
-

RESUMEN

El IDEAM en su publicación del Estudio Nacional del Agua 2014 (IDEAM, 2015), decidió incluir el indicador de huella hídrica como herramienta complementaria para la toma de decisiones en la gestión integral del recurso hídrico. El indicador de Huella Hídrica Azul -HHA- fue evaluado en las 316 subzonas hidrográficas -SZH- en las que está dividido el territorio colombiano (incluye cinco subzonas insulares) para cinco sectores económicos: agropecuario, doméstico, industrial, energético e hidrocarburos. Adicionalmente se realizó un análisis de sostenibilidad por medio del Índice de Agua No Retornada a la Cuenca -IARC- el cual permite identificar las SZH que están en estado de alerta en cuanto a su capacidad de satisfacer los consumos generados por estos sectores, como principales resultados se tiene que la HHA multisectorial total es de 9.956,8 millones de m³/año (año 2012) y una oferta de agua superficial disponible de 1.126.905 millones de m³/año, siendo el sector agropecuario el de mayor consumo representando el 70 % de la HHA multisectorial total en Colombia. El IARC identificó cuatro SZH en estado crítico por lo que éstas requieren análisis con un mayor nivel de detalle.

Palabras claves: huella hídrica azul, subzonas hidrográficas, sectores agropecuario, doméstico, industrial, energético e hidrocarburos

ABSTRACT

The Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies of Colombia -IDEAM- in its publication of the National Water Study 2014 (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM, 2015), decided to include the water footprint indicator as a complementary tool for decision making in Integrated Water Resource Management. The Blue Water Footprint indicator -BWF- was evaluated in 316 hydrographics subzones -HSZ- in which is divided the Colombian territory (including 5 insular hydrographics subzones) for five economic sectors: agriculture and livestock, domestic, industrial, energy and oil. Additionally sustainability analysis by the Index of Unreturned Water to the Source (IUWS) which identifies the HSZ who are on alert as to their ability to meet the consumption generated by these sectors was made. The main results must be multisectoral BWF total is 9.956,8 millions m³/year (year 2012) and an offer of water surface of 1.126.905,0 million m³/year, with agriculture representing the highest consumption 70 % of the total multisector BWF in Colombia. The IUWS identified four critical condition HSZ with what they require analysis with a greater level of detail.

Keywords: blue water footprint, hydrographics subzones, agricultural and livestock, domestic, industrial, energy and oil sectors

INTRODUCCIÓN

El indicador de huella hídrica es una herramienta relativamente nueva en el contexto mundial; son aproximadamente 15 años desde que el profesor Hoekstra planteara la huella hídrica como un indicador relevante para la gestión del agua. Fue este mismo profesor en compañía de otros autores quienes en el año 2011 (Hoekstra, et al., 2011) presentaron la primera publicación de una metodología para la evaluación de este indicador en cuatro fases: definición del alcance, cuantificación, análisis de sostenibilidad y formulación de propuestas a los puntos críticos.

Colombia desde hace aproximadamente cinco años viene realizando estudios de carácter regional o nacional aplicando de manera parcial o total las fases propuestas por la Water Footprint Network (Hoekstra, et al., 2011). Es así que Colombia empieza a tomar un rol importante en Latinoamérica como referente en cuanto a la aplicación de este indicador no solo desde una mirada académica sino también desde una concepción política y desde aspectos que anteriormente no se habían evaluado tales como el análisis multisectorial tomando como unidad de análisis la cuenca hidrográfica (CTA, et al., 2013a).

El acompañamiento técnico que el IDEAM realizó al proyecto Evaluación de la Huella Hídrica en la cuenca del río Porce (CTA, et al., 2013a), le permitió a esta entidad identificar la relevancia que tiene la implementación del indicador de huella hídrica como herramienta complementaria para la gestión integral del recurso hídrico. Por tal motivo, se tomó la decisión técnica y política de integrar en una primera etapa este indicador en el documento de política pública de mayor incidencia en Colombia con relación al recurso hídrico: el Estudio Nacional del Agua ENA 2014 (IDEAM, 2015).

De esta manera la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA) y Good Stuff International Latinoamérica y el Caribe (GSI-LAC) conformaron un equipo técnico para realizar un ejercicio similar al desarrollado en el estudio del Porce (CTA, et al., 2013a) pero a escala nacional, la cual está conformada por 316 subzonas hidrográficas y en las cuales se evaluarían los principales sectores económicos del país.

METODOLOGÍA

La metodología conceptual y de estimación de la HHA para los sectores agropecuario, doméstico, industrial, energético y de hidrocarburos para las 316 SZH, tuvo como soporte la metodología definida por la Water Footprint Network (Hoekstra, et al., 2011) y por los estudios desarrollados en Colombia (CTA, et al., 2013a), (CTA, et al., 2013b) y (WWF Colombia, 2012). En estas referencias se pueden consultar las definiciones, tipos de huellas hídricas, modelos de cálculo, entre otros aspectos necesarios para estimar este indicador no solamente a escala de cuenca hidrográfica sino también en otras unidades espaciales. Solo para efectos de este artículo se definirá qué es la HHA y cuáles son las principales consideraciones que se deben tener para su estimación.

De acuerdo con el manual de evaluación de huella hídrica (Hoekstra, et al., 2011), la HHA se define como “un indicador del consumo de agua azul, en otras palabras, agua superficial o agua subterránea”; en términos generales la HHA hace referencia al agua consumida (cantidad de agua que es extraída de una fuente superficial o subterránea y que no retorna a la fuente donde previamente fue extraída) en un proceso, en un producto, por una persona o una ciudad. En el momento de cuantificar la HHA se deben tener en cuenta los siguientes cuatro aspectos:

- Agua evaporada
- Agua incorporada en un producto
- Agua que retorna a otra cuenca diferente de la que fue inicialmente extraída (trasvase)
- Agua que es retornada a la misma cuenca pero en un periodo climático diferente

Estos cuatro componentes son los que representan el agua extraída y no retornada a la misma unidad de análisis y por ende son los que se deben cuantificar para estimar el indicador de huella hídrica azul (Figura 1).

RESULTADOS

Para las 316 SZH analizadas, la HHA multisectorial es de 9.956,8 millones de m³/año, sin embargo cuando se compara este valor con la oferta de agua superficial de Colombia estimada en 1.126.905 millones de m³/año, de forma general se puede estimar que las fuentes superficiales tienen la suficiente capacidad para satisfacer los consumos de agua en Colombia. De los sectores analizados, el que representa la mayor HHA es el agropecuario con una huella de 6.942,4 millones de m³/año, que representa cerca del 70 % de la HHA nacional multisectorial (Tabla 1 y Figura 2).

A continuación se presentan los principales resultados para cada uno de los sectores analizados y los resultados del Índice de Agua no Retornada a la Cuenca –IARC–.

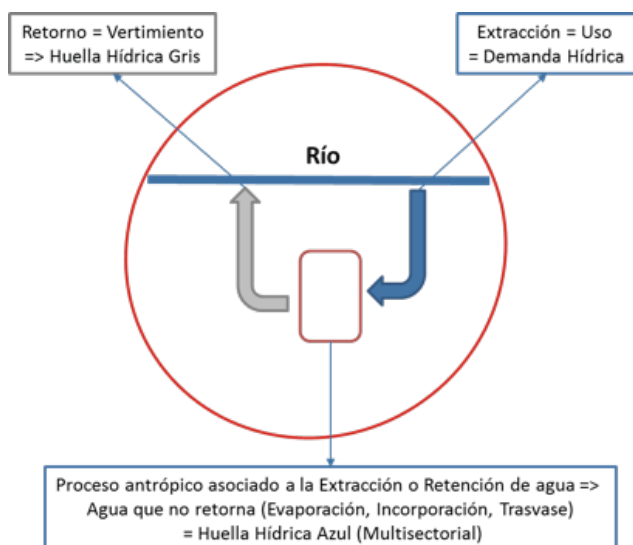


Figura 1. Esquema conceptual de la huella hídrica azul

Fuente: (IDEAM, 2015).

Sector agropecuario

En el sector agropecuario se consideraron 21 cultivos permanentes y 18 transitorios, además de dos tipos de pasto de riego. La información se recopiló especialmente del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR), además de gremios como Asocaña, Fedearroz, Fenalce, Fedepalma y Fedecafé, entre otros. La mayor HHA la presentan los pastos de corte, seguido de los cultivos de palma de aceite, plátano y caña. Por su parte, el cultivo de café no presenta HHA debido a que se considera un cultivo de secano. Los principales resultados por SZH se pueden observar en la Tabla 2.

Sector doméstico

La cuantificación de la HHA para el sector doméstico consideró la población de los 1.122 municipios reportados para Colombia para el año 2012 (Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE), la información de consumos de agua reportada en la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2012) y las dotaciones establecidas en el RAS 2000 (Ministerio de Desarrollo Económico, Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2000). Los principales resultados se pueden observar en la Tabla 3.

Sector industrial

Para el sector industrial se consideró la información proveniente del Registro Único Ambiental –RUA– (IDEAM, 2012), el cual tiene aproximadamente 1.700 registros de empresas que reportan los volúmenes de agua usados y vertidos. Es importante aclarar que debido a que la huella hídrica azul de este sector se realizó solo para una muestra de industrias, es posible que las estimaciones en este indicador estén por debajo de los consumos reales en el país, se espera que a futuro se pueda contar con mayor información en este sector para lograr cálculos más precisos.

Sector energético

Para el sector energético se tuvo en cuenta los embalses hidroeléctricos y las centrales térmicas. Del total de HHA para este sector los embalses representan el 96,4 % mientras que las centrales solo corresponden al 3,6 %. Las principales fuentes de información fueron las empresas operadoras de los embalses¹, la Unidad de Planeación Minero Energética (Ministerio de Minas y Energía de Colombia - Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2012) y el IDEAM². Los resultados de las principales SZH se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 1. Huella hídrica azul por sector económico

Sector	Huella hídrica azul (Millones de m ³ /año)	Porcentaje nacional (%)
Agropecuario	6.942,4	69,7
Doméstico	385,8	3,9
Industrial	65,4	0,7
Energético	297,4	3,0
Hidrocarburos	6,6	0,1
Trasvases	2.259,2	22,7

Fuente: (IDEAM, 2015).

¹ Las empresas que suministraron información fueron las siguientes: ISAGEN, EPM, CAR Cundinamarca, EEB, Emgesa, Chivor, EPSA, URRRA y VATIA.

² Información suministrada por el IDEAM de las estaciones de medición con datos de evaporación en embalses.

Tabla 2. Huella hídrica azul sector agrícola principales SZH

Código SZH	Nombres SZH	Huella hídrica azul (Millones de M ³ /año)	Porcentaje nacional (%)
2120	Río Bogotá	351,3	5,1
2906	Ciénaga Grande de Santa Marta	293,8	4,2
1206	Arroyos directos al Caribe	276,8	4
2903	Canal del Dique margen derecho	234,6	3,4
1506	Río Ranchería	230,7	3,3

Fuente: (IDEAM, 2015).

Tabla 3. Huella hídrica azul sector doméstico principales SZH

Código SZH	Nombres SZH	Huella hídrica azul (Millones de M ³ /año)	Porcentaje nacional (%)
2120	Río Bogotá	61,3	15,9
2701	Río Porce	28,6	7,4
1206	Ríos Lili, Meléndez, y Cañaveralejo	17,2	4,5
2903	Río Lebrija y otros directos al Magdalena	11,9	3,1
1506	Bajo San Jorge La Mojana	10,1	2,6

Fuente: (IDEAM, 2015).

Sector hidrocarburos

Para este sector solo se consideró la fase de extracción de hidrocarburos (petróleo). La información básicamente fue obtenida de dos fuentes: la Asociación Colombiana del Petróleo ACP (Asociación Colombiana del Petróleo ACP, 2012) y de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2014). Los resultados de las principales SZH se presentan en la Tabla 5.

Índice de agua no retornada a la cuenca

Una vez cuantificada la huella hídrica azul multisectorial por SZH, fue necesario identificar aquellas zonas que pueden presentar problemas para satisfacer los consumos de agua por parte de los sectores económicos.

Esto se convierte en una herramienta contundente que determina qué cuencas requieren intervenciones prioritarias. La información para realizar este análisis corresponde a la oferta superficial (ENA, 2015) y la huella hídrica multisectorial.

En la Figura 3, se representa la oferta de agua superficial (mapa izquierdo) y el IARC (mapa derecho). De este último mapa se identificaron cuatro subzonas hidrográficas (Tabla 7) que presentan estado crítico; esto en principio significa que la HHA es superior a la oferta superficial, lo que implicaría problemas graves de escasez de agua en una escala temporal anual. Esto es una alarma para que estas subzonas se estudien con un mayor nivel de detalle y en el caso que se esté presentando esta situación adoptar las medidas pertinentes.

¹ Las empresas que suministraron información fueron las siguientes: ISAGEN, EPM, CAR Cundinamarca, EEB, Emgesa, Chivor, EPSA, URRRA y VATIA.

² Información suministrada por el IDEAM de las estaciones de medición con datos de evaporación en embalses.

Tabla 4. Huella hídrica azul sector energético por SZH

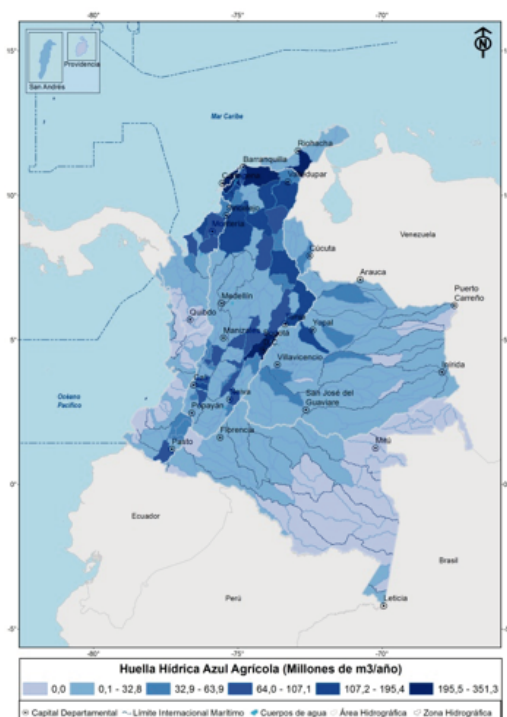
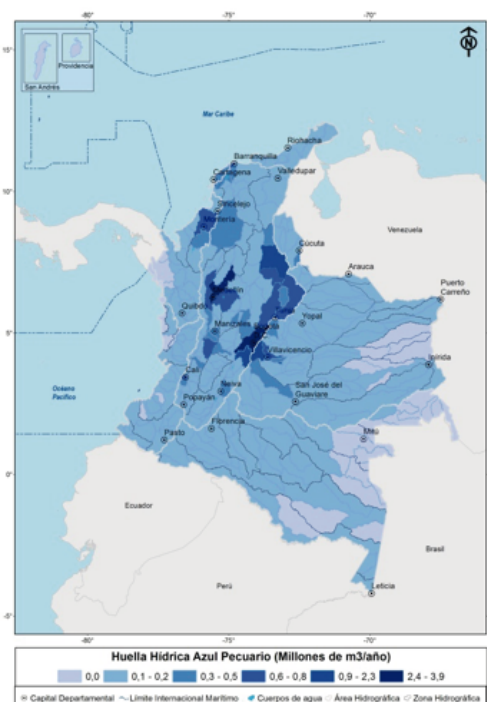
Código SZH	Nombres SZH	Huella hídrica azul (Millones de M ³ /año)	Porcentaje nacional (%)
2108	Río Yaguará y Río Iquira	79,1	26,6
1301	Alto Sinú-Urrá	68,8	23,1
1206	Río Nare	49,3	16,6
2903	Río Prado	18,5	6,2
1506	Río Bogotá	17,3	5,8

Fuente: (IDEAM, 2015).

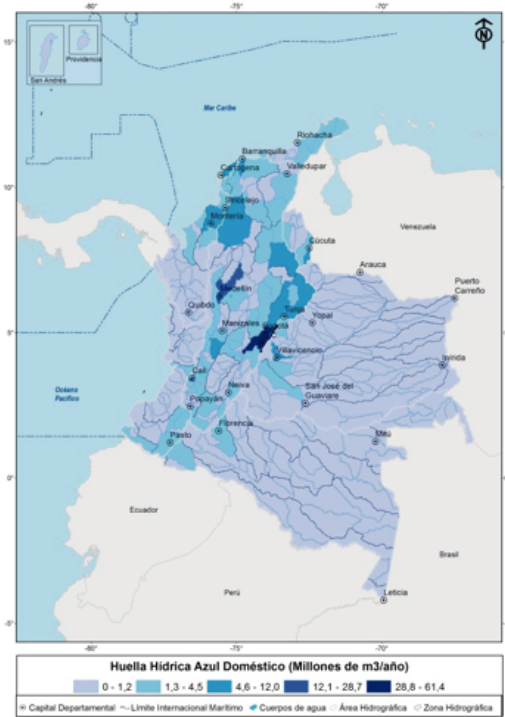
Tabla 5. Huella hídrica azul sector hidrocarburos por SZH

Código SZH	Nombres SZH	Huella hídrica azul (Millones de M ³ /año)
3301	Alto Vichada	1.245.556,6
3501	Río Metica	446.777,7
3521	Río Cravo Sur	349.838,2
3519	Río Cusiana	230.820,6
3603	Río Cravo Norte	204.183,4

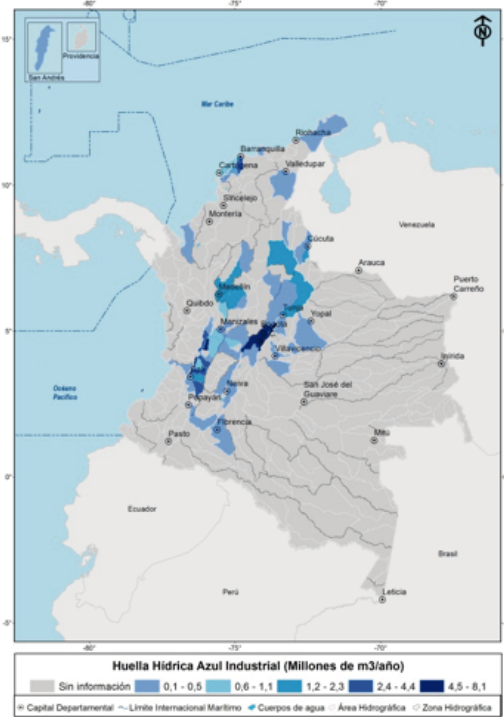
Fuente: (IDEAM, 2015).

**Distribución anual y espacial de la HHA del sector agrícola por SZH****Distribución anual y espacial de la HHA del sector pecuario por SZH****Figura 2.** Distribución anual y espacial de la huella hídrica azul para los sectores analizados

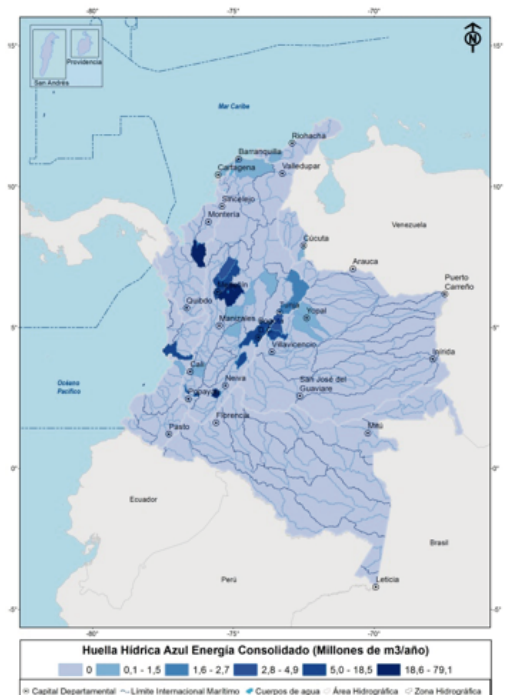
Fuente: (IDEAM, 2015).



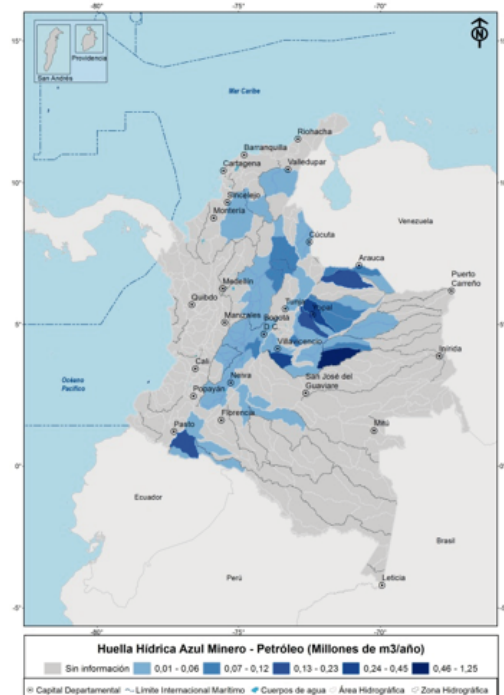
Distribución anual y espacial de la HHA del sector doméstico por SZH



Distribución anual y espacial de la HHA del sector industrial por SZH



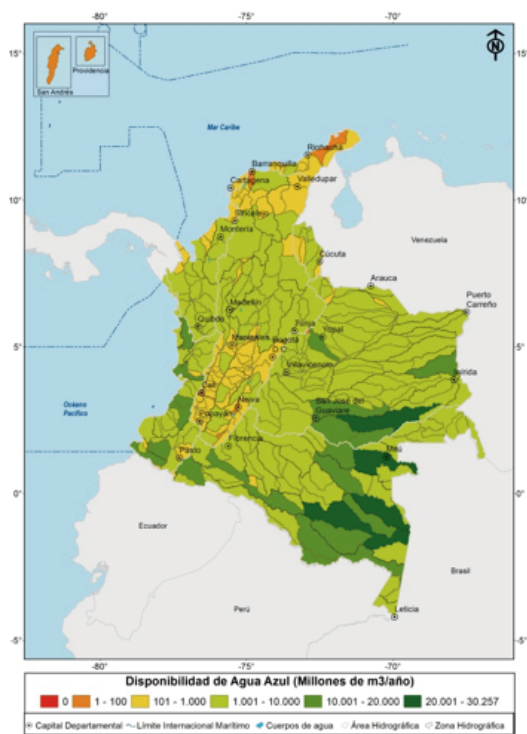
Distribución anual y espacial de la HHA del sector energético por SZH



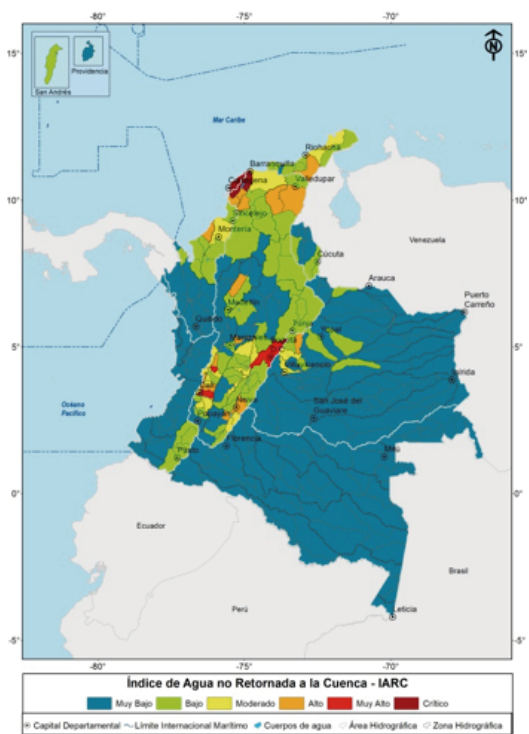
Distribución anual y espacial de la HHA del sector hidrocarburos por SZH

Figura 2. Distribución anual y espacial de la huella hídrica azul para los sectores analizados

Fuente: (IDEAM, 2015).



Distribución anual y espacial de la oferta superficial de agua por SZH



Aplicación del IARC por SZH

Figura 3. Análisis de la oferta superficial del agua respecto a la HHA por SZH

Fuente: (IDEAM, 2015).

Tabla 6. Subzonas hidrográficas con IARC crítico

Código SZH	Subzona hidrográfica	Área hidrográfica	IARC
1206	Arroyos directos al Caribe	Caribe	1,05
2903	Canal del Dique margen derecho	Magdalena-Cauca	1,38
2904	Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura al mar Caribe (mi)	Magdalena-Cauca	1,31
2909	Ciénaga Mallorquín	Magdalena-Cauca	1,54

Fuente: (IDEAM, 2015).

CONCLUSIONES

En Colombia, el sector agropecuario es el que representa un mayor porcentaje de la HHA, esto en ningún momento tiene el objetivo de señalar negativamente a este sector, ya que precisamente es el que garantiza la seguridad alimentaria de sus habitantes. Lo que pretenden este tipo de indicadores es que los diferentes sectores cada vez sean más eficientes con el uso del agua y de esta manera se disminuya la presión sobre las fuentes superficiales o subterráneas.

Para las cuatro subzonas identificadas como críticas por el IARC se recomienda hacer estudios con mayor detalle que permitan definir si efectivamente en estas zonas se está presentando escasez del recurso o si por el contrario su sistema productivo se soporta en fuentes subterráneas, algo común en el área donde se ubican estas subzonas hidrográficas (Costa Atlántica).

Hasta el momento no se cuenta con información relevante sobre la oferta de agua subterránea en Colombia. Es importante que por parte del IDEAM se trabaje en este aspecto, ya que diferentes zonas de Colombia hacen un uso importante de este recurso (Costa Atlántica o Valle del Cauca).

La resolución temporal de los resultados es anual, pero para tener un panorama más detallado se recomienda generar información con resolución mensual, de esta forma los análisis permiten determinar qué meses del año pueden ser más críticos y por ende adoptar las medidas necesarias a implementar para evitar que la HHA supere a la oferta de agua.

La relevancia de la inclusión de la huella hídrica azul y de su indicador de sostenibilidad (IARC) en estudios como el ENA 2014, radica en que bajo este tipo de herramientas se puede garantizar una evaluación y seguimiento periódico del uso del recurso hídrico en el país. Es de gran importancia que bajo otros instrumentos de planificación territorial, como las Evaluaciones Regionales del Agua – ERA- y los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas -POMCAS- se comience a incorporar este tipo de herramientas para obtener resultados a escalas locales.

BIBLIOGRAFÍA

Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2014). Recuperado el 30 de Diciembre de 2014, de <http://www.anh.gov.co/Asignacion-de-areas/Paginas/Mapa-de-tierras.aspx>

Asociación Colombiana del Petróleo ACP. (2012). Recuperado el 30 de Julio de 2012, de <http://www.acp.com.co/index.php/es/informe-estadistico-petrolero-iep>

CTA, et al. (2013). *Guía metodológica de aplicación de Huella Hídrica en cuenca*. Medellín.

CTA, et al. (2013). *Evaluación de la Huella Hídrica en la cuenca del río Porce*. Medellín.

DANE.(s.f). Recuperado el 10 de Marzo de 2014, de <https://www.dane.gov.co/index.php/poblacion-y-demografia/proyecciones-de-poblacion>

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

IDEAM. (2012). *Registro Único Ambiental RUA*. Bogotá.

IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá.

IDEAM. (2015). *Evaluación multisectorial de la huella hídrica en Colombia. Resultados por subzonas hidrográficas en el marco del estudio nacional del agua 2014*. Bogotá.

Ministerio de Desarrollo Económico. Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. (2000). *Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000*. Bogotá.

Ministerio de Minas y Energía de Colombia - Unidad de Planeación Minero Energética UPME. (2012). *Sistema de Información Eléctrico Colombiano SIEL*. Recuperado el 1 de Agosto de 2014, de [http://www.upme.gov.co/Reports/Default.aspx?ReportPath=%2fSIEL+UPME%2fGeneraci%C3%B3n%2fConsumo+de+Combustible+\(SIN\)](http://www.upme.gov.co/Reports/Default.aspx?ReportPath=%2fSIEL+UPME%2fGeneraci%C3%B3n%2fConsumo+de+Combustible+(SIN))

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2012). Obtenido de <http://reportes.sui.gov.co/fabricaReportes/frameSet.jsp?>

WWF Colombia. (2012). *Una mirada a la agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica*. Bogotá.

3

EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE LA HUELLA HÍDRICA VERDE EN COLOMBIA

EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE LA HUELLA HÍDRICA VERDE EN COLOMBIA

Autores:

- **Carolina Rodríguez**
Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA
crodriguez@cta.org.co
 - **Erika Zárate.**
Good Stuff International - Suiza
erika@goodstuffinternational.com
-

RESUMEN

Colombia tiene un gran potencial para explotar productivamente el valioso recurso de agua verde. Pese a que gran parte de la agricultura y de la ganadería en el país se sustenta en este recurso existe escasa investigación en el tema, pues hasta el momento todos los esfuerzos se han concentrado en el agua azul. En 2015, el IDEAM en su publicación del Estudio Nacional del Agua decidió incluir el indicador de huella hídrica como herramienta complementaria para la toma de decisiones en la gestión integral del recurso hídrico. En este estudio se calculó la huella hídrica verde (HHV) para los sectores agrícola y pecuario del país y se evaluó la sostenibilidad de esta huella a través del Índice de Presión sobre los Ecosistemas (IPHE). En este artículo se muestran los resultados más relevantes obtenidos tras esta investigación en cuanto al tema de agua verde. El análisis se realizó para 311 subzonas hidrográficas (SZH) continentales del país, observando que existen 22 SZH con índice en valores "críticos" y 22 en valores "muy altos", lo cual evidencia que existe competencia por el agua verde entre los usos productivos y las áreas declaradas como protegidas, aún cuando en la zonificación ambiental de estas áreas se prohíba algún uso diferente al de conservación y preservación de los recursos naturales. Con este análisis se pone en consideración a los ecosistemas como usuarios del agua y se manifiestan las posibles competencias por este recurso asociadas a conflictos por los usos del suelo.

Palabras claves: agua verde, huella hídrica verde, subzona hidrográfica, sector agrícola, sector pecuario, ecosistemas, áreas protegidas.

ABSTRACT

Colombia has great potential to productively use the valuable green water resource. Although in Colombia agriculture is mostly based on green water (including livestock), research on availability and consumption of this resource is limited. This is because until now, water-related research has been focused on blue water. The Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies of Colombia (IDEAM; by its Spanish acronym) decided to include the water footprint in the National Water Study (ENA, 2014; by its Spanish acronym), as a tool to support decision making in Water Resource Management in Colombia. ENA included the green water footprint (HHV; by its Spanish acronym) accounting of the agriculture and livestock sectors in Colombia. The sustainability assessment of green water footprints was done using the Water Pressure on Ecosystems Index (IPHE; by its Spanish acronym). This paper presents the most relevant results obtained from this research on the subject of green water. The analysis was made for 311 hydrographics subzones (SZH; by its Spanish acronym) located in Colombia's mainland. It was observed that 22 SZH have critical IPHE values, whereas other 22 SZH have very high IPHE. Results show competition for green water use between productive uses and the declared protected areas, even though the use of land for other purposes than conservation or preservation of natural resources is restricted on protected areas. This investigation puts ecosystems as users of water resources and shows the potential competition for this resource associated with land uses conflicts.

Keywords: green water, green water footprint, hydrographics subzones, agricultural sector, livestock, ecosystem, protected areas.

INTRODUCCIÓN

La huella hídrica se define como el volumen de agua usado para un proceso antrópico que no retorna a la cuenca de donde fue extraída o que es retornada con una calidad diferente a la original. Surgió como una herramienta que permitía estimar el contenido de agua oculta en cualquier bien o servicio consumido por un individuo o grupo de individuos (IDEAM, 2015) y se desarrolló a partir del concepto de agua verde (precipitación sobre la tierra que no fluye como escorrentía y no recarga acuíferos sino que permanece almacenada en el suelo como humedad), introducido por Falkenmark (2003) y del concepto de agua virtual desarrollado por Allan (1998); Clark Sarlin & Sharma (2014) y Parada-Puig (2012), el cual se refería no solo al agua "contenida" en un producto sino también a la necesaria para su producción (Hoekstra, 2003).

En el concepto de huella hídrica se distinguen tres componentes: azul, verde y gris. La huella hídrica azul es un indicador del consumo de agua azul, es decir, del agua extraída de una fuente superficial o subterránea; el segundo es un indicador del consumo de agua verde, la cual es aprovechada para fines productivos tales como la agricultura, la ganadería o las explotaciones forestales, y la huella hídrica gris es el volumen de agua que es requerido para asimilar la carga de contaminantes en una fuente específica.

La huella hídrica verde se cuantifica mediante la estimación del agua evapotranspirada por la vegetación asociada a un proceso antrópico que no tiene como origen el agua de riego (IDEAM, 2015) y su análisis de sostenibilidad busca evaluar la escasez de los recursos de agua verde, los cuales son limitados, y deben ser asignados a diferentes actividades en relación con su disponibilidad. Este análisis cuenta a los ecosistemas como usuarios del agua e identifica la competencia por agua verde en un territorio asociada a los usos del suelo entre las áreas destinadas a la producción agropecuaria y las áreas protegidas y ecosistemas estratégicos del país.

La huella hídrica ha sido utilizada como una herramienta que apoya la gestión integral de los recursos hídricos en una cuenca y recientemente fue introducido por el IDEAM en su publicación del Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2015).

En Colombia, a nivel territorial se han realizado tres aproximaciones a este concepto. La primera de ellas realizada por World Wildlife Fund for Nature (WWF, 2012) en donde se estimó la huella hídrica verde para 11 cultivos del sector agrícola colombiano y su distribución por departamentos y municipios. Seguida a esta se realizó la "Evaluación de la Huella Hídrica en la cuenca del río Porce" (CTA et al, 2013a), de donde surge la formulación de la "Guía Metodológica de Aplicación de Huella Hídrica en Cuenca" (CTA et al, 2013b). Finalmente, la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA), Good Stuff International para Latinoamérica y el Caribe (GSI – LAC) y el IDEAM estimaron la huella hídrica verde para las 316 subzonas hidrográficas del país y realizaron el análisis de sostenibilidad de esta huella hídrica para las 311 subzonas hidrográficas continentales basados en el Índice de Presión Hídrica a los Ecosistemas (IPHE)¹.

El objetivo de este artículo es reportar los resultados más relevantes obtenidos mediante la evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica verde para las 311 subzonas hidrográficas continentales de Colombia, mediante el cálculo del IPHE para cada una de ellas según la metodología propuesta por el manual de huella hídrica (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011) y profundizada por el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA et al, 2013b).

METODOLOGÍA

El análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica verde en Colombia parte de los resultados obtenidos para la huella hídrica verde de los sectores agrícola y pecuario (CTA, IDEAM, COSUDE, & GSI-LAC, 2015; IDEAM, 2015). En Colombia, la estimación de este indicador se realizó para 21 cultivos permanentes priorizados y 18 cultivos transitorios y se agruparon en la categoría "otros" los demás cultivos agrícolas del país, logrando incluir en su totalidad los cultivos que tienen producción en el país. En cuanto al sector pecuario, se calculó la huella hídrica verde de los pastos de corte, de cultivos forrajero, naturales, mejorados, y de sistemas silvopastoriles.

La sostenibilidad de la huella hídrica verde total de una cuenca en un periodo de tiempo dado se evalúa en el contexto del agua verde total disponible en esa cuenca durante ese periodo de tiempo.

¹ El IPHE corresponde al término "Índice de escasez de agua verde", denominado en el manual "*Green Water Scarcity Index*", publicado por la Red de Huella Hídrica (Water Footprint Network) según la metodología y las definiciones presentadas en el Manual de Huella Hídrica (Hoekstra et al., 2011).

La disponibilidad de agua verde ($DAV_{x,t}$) según Hoekstra & Mekonnen (2011) se calcula como la evapotranspiración verde total ($ET_{x,t}$) esto es, la evapotranspiración real en la cuenca en el periodo de estudio menos la evapotranspiración de las áreas que deben preservarse para la prestación de servicios y de bienes ecosistémicos o áreas protegidas ($ET_{x,t(natural)}$) menos la evapotranspiración que no puede hacerse productiva ($ET_{x,t(no_prod)}$)(Ecuación 1).

Ecuación 1.

$$DAV_{x,t} = ET_{x,t} - ET_{x,t(natural)} - ET_{x,t(no_prod)}$$

La DAV se considera como el agua disponible para las actividades humanas productivas en un área específica y la sostenibilidad de la huella hídrica verde se evalúa a través del IPHE mediante la relación entre la DAV y el agua verde consumida por las actividades humanas productivas, es decir, la huella hídrica verde HHV (Ecuación 2).

Ecuación 2.

$$IPHE = \frac{\sum HHV}{DAV}$$

Los cálculos se realizaron para las 311 subzonas hidrográfica continentales de Colombia, en las cuales se identificaron: áreas productivas, áreas naturales y áreas intervenidas (Tabla 1), según una reclasificación del mapa de coberturas terrestres escala 1:100.000 con la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia (IDEAM, 2010). Se crearon otras dos categorías para las coberturas que no son de interés para el análisis de la huella hídrica verde, como aquellas cuya evapotranspiración es únicamente azul (ejemplo los cultivos confinados, o la evapotranspiración de ríos), o que corresponden a zonas oceánicas en las cuales no se calcula la huella hídrica y una categoría "sin información" para áreas que en el mapa de coberturas son espacios con nubes o con sombras de nubes que no permitieron la identificación de una cobertura terrestre como tal.

Las áreas protegidas se identificaron con base en el mapa de Parques Nacionales Naturales de Colombia (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2013), el mapa de Reservas Naturales de la Sociedad Civil (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2014) y el

mapa de límites cartográficos de los Complejos de Páramos de Colombia (Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander Von Humboldt & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012) (Figura 1).

La evapotranspiración de la cuenca se estimó con base en el mapa de evapotranspiración real anual suministrado por el IDEAM (IDEAM, 2015), el cual se basa en el método de Budyko y se encuentra distribuido geográficamente para todo el país en celdas de 2 km x 2 km. Esta evapotranspiración se refiere a una interpolación espacial con el método IDW², la cual utiliza los datos de precipitación media anual para el periodo 1974 - 2012 y de evapotranspiración potencial calculado por el método de Penman para 2046 estaciones hidroclimatológicas.

RESULTADOS

La reclasificación de las coberturas terrestres en Colombia muestra que un 73,4 % del territorio se encuentra en áreas naturales, el 21,5 % corresponde a áreas productivas y el 0,4 % corresponde a áreas intervenidas. El 4,8 % restante se refiere a áreas sin información o en la categoría "no aplica" para el análisis de agua verde (Figura 1).

Por su parte, las áreas protegidas del país corresponden a 15,1 % del territorio colombiano, entre estas se encuentran 2.905.156,7 ha de páramos.

Al realizar una superposición del mapa de coberturas terrestres con el mapa obtenido para las áreas protegidas se observa que existen áreas que pese a encontrarse protegidas presentan una cobertura "no natural" en el mapa de coberturas terrestres. Esto significa que ocurren actividades productivas o actividades humanas importantes.

La identificación de estos usos del suelo en zonas de protección indica una competencia por agua verde y para evaluar esta competencia se calculó la DAV por subzona hidrográfica y para el total del país. En Colombia la DAV es de 1.221.345,9 millones de m³/año. Este valor es interesante si se compara con la precipitación total nacional que es de 3.153.754,2 millones de m³/año (valores medios mensuales de las series de 2046 estaciones del IDEAM para el periodo 1974 - 2012; (IDEAM, 2015).

² Método de interpolación mediante la distancia inversa ponderada.

Tabla 1. Consideraciones para la reclasificación de las coberturas terrestres en Colombia

Categoría	Consideraciones
Áreas productivas	Áreas con fines productivos, sean agrícolas, pecuarias o de explotación forestal. En cuanto a los pastos se consideran todos los pastos limpios y arbolados, pues se asume que son los tipos de pastos destinados a la ganadería.
Áreas naturales	Considera tanto las áreas con vegetación natural como aquellas sin vegetación, pero que provienen de procesos naturales. Incluye todos los tipos de bosques naturales, herbazales, arbustales y vegetación secundaria; así mismo, los pastos enmalezados por considerarse en un estado avanzado de sucesión y no como áreas dedicadas a la ganadería. También incluye áreas provenientes de procesos naturales tales como las zonas arenosas naturales, afloramientos rocosos, tierras desnudas o degradadas y las zonas quemadas, pantanosas y costeras, entre otras.
Áreas intervenidas	Áreas que han sido modificadas o construidas por el hombre, que no corresponden a áreas agrícolas, pecuarias o forestales. Considera los asentamientos humanos, zonas industriales y comerciales, la red vial, zonas productivas mineras y de depósitos, entre otras. Pueden tener evapotranspiración verde como, por ejemplo, la evapotranspiración que ocurre en zonas de recreación. Esta evapotranspiración verde se asume como no productiva desde el punto de vista agrícola.

Fuente: Elaboración propia.

Esto muestra que el 38,7 % de la precipitación en Colombia está disponible para fines productivos como agua verde.

La DAV por área hidrográfica muestra que las áreas hidrográficas Orinoco y Amazonas son las que mayor disponibilidad de agua verde presentan con 397.465,6 y 363.478,2 millones de m³/año respectivamente. En cuanto a los valores por zona hidrográfica se observa que la zona Caquetá es la que mayor disponibilidad de agua verde en total presenta, caso contrario de la zona Apure que presenta una disponibilidad de agua igual a cero debido a que toda la zona se encuentra en el PNN Tamá, considerado área protegida fronteriza de carácter binacional.

Por subzona hidrográfica se evidenció que las subzonas Alto río Apure, localizada en la zona hidrográfica Apure mencionada anteriormente y a la subzona del río Cuñare, localizada en la zona hidrográfica Yarí del Amazonas, presentan una DAV igual a cero. Son zonas localizadas en Parques Nacionales Naturales en donde la zonificación de usos prohíbe las actividades productivas, reservándolas exclusivamente a la conservación y a la preservación de los recursos naturales. Se presentan además, algunas subzonas con una DAV muy baja, estas son las del río Luisa, río Puré, río Cali y río Anchicayá (Tabla 2).

Las subzonas hidrográficas de mayor disponibilidad de agua corresponden a río Caquetá Bajo y río Caquetá Medio de la zona Caquetá (Tabla 3). Estas subzonas presentan una alta evapotranspiración total verde y parte de su evapotranspiración es destinada a áreas protegidas como lo son el PNN río Puré y PNN Cahuinarí para el río Caquetá Bajo y PNN La Paya, PNN Alto Fragua – Indiwasi y PNN Serranía de los Churumbelos para el río Caquetá Medio; sin embargo, en estas subzonas existen áreas naturales que, según la metodología empleada, tienen evapotranspiración que está siendo contabilizada en la DAV. Con este tipo de análisis debe tenerse especial cuidado, ya que algunas de esas áreas naturales, pero no protegidas, pueden ser de gran importancia para su conservación.

Con los resultados obtenidos de DAV por subzona hidrográfica es pertinente evaluar qué tan sostenible son las actividades productivas que se presentan en estas zonas. Este análisis se realizó a través del IPHE (Ecuación 2), calculado por subzona hidrográfica teniendo en cuenta la huella hídrica verde obtenida para el sector agrícola y el sector pecuario. En el sector agrícola se incluyen los cultivos permanentes, transitorios y los pastos de corte y forrajeros (HHV = 54.914,8 millones de m³/año), en este caso no se incluye el agua de riego que está cuantificada en la huella hídrica azul. En el sector pecuario se incluyen los pastos utilizados en ganadería extensiva (naturales, mejorados y en sistema silvopastoril - HHV = 245.536,7 millones de m³/año)³.

³ La huella hídrica se basa en la apropiación humana de recurso hídrico, que en la mayoría de los casos tiene como objetivo un fin económico. En este orden de ideas, la huella hídrica verde de los pastos de ganadería extensiva solo se presenta como una relación de la disponibilidad de pastos con el inventario ganadero, generándose solo la huella hídrica verde proporcional al consumo de materia seca por parte del ganado.



Figura 1. Mapa de áreas protegidas en Colombia: páramos y otras áreas protegidas

Fuente: Elaboración propia

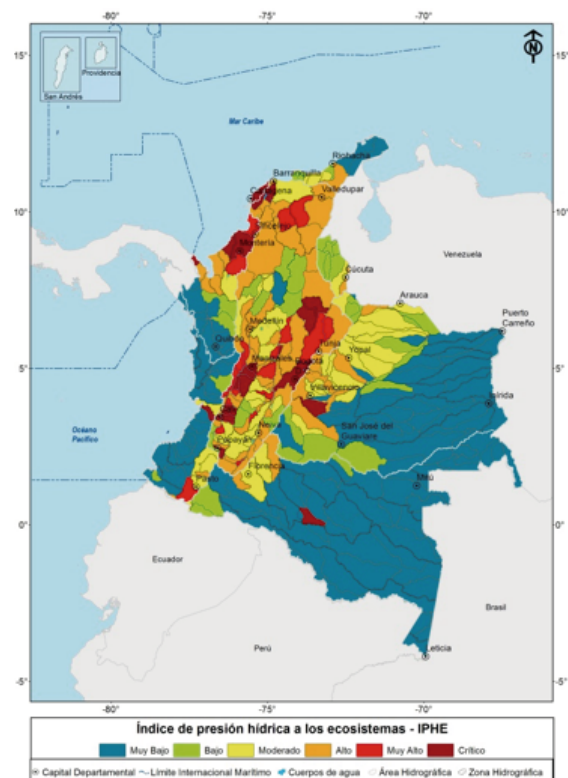


Figura 3. Mapa de IPHE por subzona hidrográfica en Colombia

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados obtenidos se establecieron seis rangos para los valores del IPHE, evidenciando el nivel de competencia por el agua verde entre las áreas protegidas y el sector agropecuario en las subzonas hidrográficas (Tabla 4).

Los resultados de este índice evidencian 22 subzonas hidrográficas que presentan IPHE "crítico", en estas subzonas la DAV es limitada y la huella hídrica verde agropecuaria es mayor a cero y superior a la disponibilidad de agua verde. La subzona con IPHE más alto es la del río Metica (Guamal - Humadea). En esta la presencia de áreas protegidas es muy poca y corresponde a una pequeña parte del complejo de páramos Cruz Verde – Sumapaz. Sin embargo, en esta subzona la huella hídrica verde agropecuaria es de 8.229,1 millones de $m^3/año$, de la cual el 89 % está asociada al sector pecuario. Este valor de huella hídrica contrasta con la DAV de la subzona, la cual es de 4.650,3 millones de $m^3/año$. En la Tabla 5 se presentan las subzonas hidrográficas con IPHE crítico, las cuales deberían ser foco de observación y de estudio especial para buscar medidas tendientes a su recuperación.

En la Figura 3 se observa el IPHE obtenido por subzona hidrográfica. Para profundizar sobre los resultados obtenidos por subzona remitase a (CTA et al., 2015).



Figura 2. Mapa de coberturas del suelo para Colombia según las cinco categorías relevantes para el análisis de agua verde

Fuente: (IDEAM, 2010).

Tabla 2. Subzonas hidrográficas con menor disponibilidad de agua verde

SZH	Subzona hidrográfica	Zona hidrográfica	Área hidrográfica	DAV (Millones de m ³ /año)
3901	Alto Río Apure	Apure	Orinoco	—
4509	Río Cuñare	Yarí	Amazonas	—
4505	Río Luisa	Yarí	Amazonas	8,7
4420	Río Puré	Caquetá	Amazonas	14,2
2634	Ríos Cali	Cauca	Magdalena Cauca	43,7
5310	Río Archicayá	Tapaje - Dagua - Directos	Pacífico	46,9

Fuente: (IDEAM, 2015).

Tabla 3. Subzonas hidrográficas con mayor disponibilidad de agua verde.

SZH	Subzona hidrográfica	Zona hidrográfica	Área hidrográfica	DAV (Millones de m ³ /año)
4415	Río Caquetá Bajo	Caquetá	Amazonas	28.764,3
4402	Río Caquetá Medio	Caquetá	Amazonas	20.436,0
2502	Bajo San Jorge La Mojana	Bajo Magdalena Cauca-San Jorge	Magdalena Cauca	19.818,6
4706	Río Putumayo Bajo	Putumayo	Amazonas	19.257,3
3104	Río Inírida Medio	Inírida	Orinoco	19.140,6

Fuente: (IDEAM, 2015).

Tabla 4. Calificación del IPHE

SZH	Subzona hidrográfica	Zona hidrográfica
> 1,0	"Crítico"	Clara competencia por agua verde
0,8 - 1,0	"Muy Alto"	Situación límite en términos de competencia por agua verde
0,5 - 0,8	"Alto"	Evidencia alta de competencia por agua verde
0,3 - 0,5	"Moderado"	Alerta de demanda de agua verde que supera el 30 % del total disponible
0,1 - 0,3	"Bajo"	Demanda de agua verde que se encuentra entre el 10 % y 30 % del total disponible
< 0,1	"Muy Bajo"	Situación favorable para ecosistemas estratégicos

Fuente: (IDEAM, 2015).

Tabla 5. Subzonas hidrográficas IPHE Crítico.

SZH	Subzona hidrográfica	Zona hidrográfica	Área hidrográfica	IPHE
3501	Río Metica (Guamal-Humadea)	Meta	Orinoco	1,77
4505	Río Luisa	Yarí	Amazonas	1,47
2634	Río Cali	Cauca	Magdalena Cauca	1,44
2405	Río Sogamoso	Sogamoso	Magdalena Cauca	1,34
2314	Río Opón	Medio Magdalena	Magdalena Cauca	1,26
2903	Canal del Dique margen derecho	Bajo Magdalena	Magdalena Cauca	1,22
1204	Río Canalete y otros arroyos directos al Caribe	Caribe-Litoral	Caribe	1,21
2613	Río Atún y otros directos al Cauca	Cauca	Magdalena Cauca	1,21
2303	Directos al Magdalena entre ríos Seco y Negro /MD)	Medio Magdalena	Magdalena Cauca	1,20
1303	Bajo Sinú	Sinú	Caribe	1,19
1206	Arroyos directos al Caribe	Caribe-Litoral	Caribe	1,18
2637	Ríos Las Cabañas Los Micos y Obando	Cauca	Magdalena Cauca	1,16
2120	Río Bogotá	Alto Magdalena	Magdalena Cauca	1,14
2637	Río Guachal (Bolo-Fraile y Párraga)	Cauca	Magdalena Cauca	1,13
2904	Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura al mar Caribe	Bajo Magdalena	Magdalena Cauca	1,10
2609	Ríos Amaime y Cerrito	Cauca	Magdalena Cauca	1,09
2615	Río Chinchiná	Cauca	Magdalena Cauca	1,07
1116	Río Tolo y otros directos al Caribe	Atrato-Darién	Caribe	1,07
2601	Alto Río Cauca	Cauca	Magdalena Cauca	1,04
2632	Ríos Guabas, Sabaletas y Sonso	Cauca	Magdalena Cauca	1,04
2612	Río La Vieja	Cauca	Magdalena Cauca	1,02
5310	Río Archicayá	Tapaje-Dagua-Directos	Pacífico	1,00

Fuente: (IDEAM, 2015).

CONCLUSIONES

El agua verde es un tema de investigación aún con muchos retos en el país. Esta es una primera aproximación a su cuantificación, de la cual se evidencia la importancia de este recurso para Colombia. Los resultados obtenidos mediante el cálculo de la huella hídrica azul y verde en Colombia (CTA et al., 2015; IDEAM, 2015) demuestran que gran parte de la agricultura y de la ganadería en el país se sustentan en agua verde; además, pone en consideración a los ecosistemas como usuarios del agua y manifiesta las posibles competencias por este recurso asociada a conflicto por los usos del suelo.

En este estudio se verificó que Colombia tiene un gran potencial para aprovechar productivamente el valioso recurso de agua verde. Sin embargo, la asignación de usos para el aprovechamiento productivo de este debe hacerse con precaución.

La metodología de cálculo propuesta por Hoekstra et al. (2011) asume en cierto modo que las áreas requeridas para la protección del ecosistema y la biodiversidad (requisito de agua verde ambiental) ya han sido predefinidas. Según estas premisas, la DAV se refiere al agua verde disponible para usos productivos. No obstante, para el caso colombiano existen muchas SZH con áreas naturales que no están protegidas, es decir, presentan agua verde disponible con fines productivos potenciales. La información generada en este análisis es muy valiosa para determinar en términos de agua verde y suelo en qué SZH hay potencial para expansión de los usos productivos, pero, se debe ser muy cuidadoso con la identificación de las áreas de protección necesarias para el mantenimiento normal de los ecosistemas.

Este estudio mostró que existen 22 subzonas hidrográficas que sufren presión hídrica sobre sus ecosistemas ($IPHE > 1$) y otras 22 con valores muy altos. Se evidencia que existe competencia entre los usos productivos y las áreas declaradas como protegidas, aun cuando en la zonificación ambiental de estas áreas se prohíba algún uso diferente al de conservación y preservación de los recursos naturales. Estos resultados indican que debe realizarse una evaluación detallada de la situación actual de estas subzonas, pues debido a la expansión de las fronteras agrícola y pecuaria podrían llegar a estar en una situación insostenible ambientalmente.

Así mismo, aunque existen SZH que según los IPHE podrían catalogarse como "sostenibles" presentan competencia por el agua verde debido a la presencia de actividades productivas en áreas protegidas. Esto indica que el problema en estas SZH no es la poca disponibilidad de agua verde sino el uso de suelo asignado y los conflictos existentes por este.

BIBLIOGRAFÍA

- Allan, J. A. (1998). Virtual Water: A Strategic Resource: Global Solutions to Regional Deficits. *Groundwater*, 545–546.
- Clark, S., Sarlin, P., & Sharma, A. (2014). Increasing dependence on foreign water resources? An assesment of trends in global virtual water flow using a self-organizing time map. *Ecological Informatics*, 1–11.
- CTA et al. (2013a). *Evaluación de la Huella Hídrica en la cuenca del río Porce*. Medellín. Corporación Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA, Secretaría de Medio Ambiente de la Alcaldía de Medellín, Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia - CORANTIOQUIA, Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare - CORNARE, Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación - COSUDE, Empresas Públicas de Medellín - EPM, Universidad de Antioquia - Udea, Escuela de Ingeniería de Antioquia - EIA, Universidad de Medellín - UdeM, Universidad Pontificia Bolivariana - UPB, Tecnológico de Antioquia - TdeA, Centro Nacional de Producción Más Limpia y Tecnologías Ambientales - CNPML, Good Stuff International - GSI-LAC, World Wildlife Fund for Nature - WWF, Cátedra UNESCO de sostenibilidad Universidad Politécnica de Cataluña
- CTA et al. (2013b). *Guía metodológica de aplicación de huella hídrica en cuenca*. Medellín.
- CTA, IDEAM, COSUDE, & GSI-LAC. (2015). *Evaluación multisectorial de la huella hídrica en Colombia. Resultados por subzonas hidrográficas en el marco del Estudio Nacional del Agua 2014*. Medellín. Corporación Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación - COSUDE, Good Stuff International - GSI-LAC.
- Falkenmark, M. (2003). Water cycle and people: water for feeding humanity. *Land Use and Water Resources Research*, 3, 1–4. Retrieved from <http://www.luwr.com/uploads/paper03-01.pdf>
- Hoekstra, A. Y. (2003). Virtual Water Trade. In *International Expert Meeting on Virtual Water Trade* (Vol. 12, pp. 1–244). Retrieved from <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report12.pdf>
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual. Febrero 2011*. Earthscan. <http://doi.org/978-1-84971-279-8>
- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2011). *Global water scarcity: the monthly blue water footprint compared to blue water availability for the world's major river basins*. *Water*. Retrieved from <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report53-GlobalBlueWaterScarcity.pdf>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM. (2010). Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000. In *Area* (Vol. TH-62-04-1, p. 16). Commission of the European Communities OPOCE (Office for official publications of the european communities) © ECSC-EEC-EAEC.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua - ENA, 2014*. Bogotá D.C.
- Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander von Humboldt, & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). Actualización del Atlas de Páramos de Colombia. Bogotá D.C.
- Parada-Puig, G. (2012). El agua virtual: conceptos e implicaciones. *Orinoquía*, 69–76.
- Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2013). Limite de los Parques Nacionales Naturales de Colombia Versión 4 de 2013. Bogotá D.C.
- Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2014). Reservas Naturales de la Sociedad Civil versión 2 de 2014. Bogotá D.C.
- World Wildlife Fund for Nature - WWF (2012). *Una mirada a la agricultura de colombia desde su huella hídrica*.

4

**PROYECCIONES DE
FLUJOS DE AGUA
VIRTUAL DE SIETE
PRODUCTOS
AGRÍCOLAS DE
COLOMBIA 2013-2022:
UNA APLICACIÓN DE LA
DINÁMICA DE SISTEMAS Y
LA ECONOMÍA COMPLEJA**

PROYECCIONES DE FLUJOS DE AGUA VIRTUAL DE SIETE PRODUCTOS AGRÍCOLAS DE COLOMBIA 2013-2022: UNA APLICACIÓN DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS Y LA ECONOMÍA COMPLEJA¹

Autores:

- **Andrea Guzmán.**
Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia-CTA
aguzman@cta.org.co
 - **Sebastián Opina.**
Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia-CTA
sospina@cta.org.co
-

RESUMEN

Este artículo tiene como objetivo presentar los efectos del comercio internacional sobre el recurso hídrico a través del análisis y proyección de los flujos de agua virtual verde y azul, las exportaciones y el efecto del comercio internacional sobre el recurso hídrico de Colombia. Para ello se utilizarán los análisis de flujos de agua virtual verde y azul para el periodo 2013-2022 de algunos de los principales productos agrícolas exportables del país: café, flores, aceite de palma, azúcar, cacao, plátano y banano. Se utiliza un modelo de dinámica de sistemas para modelar las exportaciones de cada uno de estos productos. Los principales resultados del modelamiento, muestran que el azúcar es el producto que mayor presión ejerce sobre el recurso hídrico, lo que evidencia la necesidad de implementar medidas desde la producción para hacerla más eficiente en términos hídricos.

Palabras claves: agua virtual azul, agua virtual verde, exportaciones, Vensim.

ABSTRACT

This document presents the projections, the analysis of exports and the effects of the international commerce of the main exportable agricultural products of Colombia, over the water resource. This analysis were explain through the virtual water flows for the year 2022. This document uses a dynamic model of systems to simulate the international commerce of coffee, flowers, oil palm, sugar, cocoa and bananas. The main results presented here, show that the international commerce of sugar has the greatest pressure over water.

Keywords: Blue Virtual Water, Green Virtual Water, International Commerce, Vensim

¹ Este artículo es escrito en el marco del proyecto Aplicación de la Huella Hídrica en el Estudio Nacional del Agua realizado por la Corporación Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia-CTA, Good Stuff International-GSI y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia-IDEAM con el apoyo de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación-COSUDE.

INTRODUCCIÓN

Mirar hacia el futuro es un proceso importante para la planeación puesto que permite identificar las consecuencias de las acciones del presente en el futuro y por ende emprender medidas que amplíen o contengan esas consecuencias, a partir de unas metas o restricciones.

Cuando se trata de un elemento estratégico y vital como el agua, la planeación adquiere una mayor relevancia, ya que da herramientas para materializar estrategias que aseguren la provisión sostenible para las generaciones venideras.

En este sentido, vale la pena preguntarse qué factores influyen sobre el uso del agua y cómo la evolución de éstos puede afectarlo en el futuro. Uno de estos factores, es el consumo de agua utilizado con fines agrícolas a nivel mundial, el cual consume alrededor del 70 % del agua total usada (Parada-Puig, 2012).

Teniendo en cuenta lo anterior, junto con la vocación exportadora de Colombia de productos primarios, enmarcada en un contexto de liberalización comercial, emerge la importancia de preguntarse qué tanto influye el comercio internacional de productos agrícolas sobre el recurso hídrico y cuál de los productos agrícolas exportables impactará más en el futuro.

Es importante hacer un análisis del indicador de huella hídrica de los productos agrícolas, conocer el volumen de producción y sus destinos comerciales, para poder proyectar y responder estas preguntas

De acuerdo a lo anterior, el objetivo de este artículo es mostrar y modelar la presión que podría ejercer el comercio internacional de siete productos de la oferta exportable de Colombia, sobre el recurso hídrico al 2022. Para realizar esto, el documento recurre al concepto de flujos de agua virtual cuya definición y método de cálculo se mostrarán en la primera parte del documento.

Teniendo en cuenta el método de cálculo, se describe el modelo de dinámica de sistemas empleado para proyectar las exportaciones al 2022.

Posteriormente, teniendo en cuenta los resultados del modelo junto con las proyecciones de producción de cada uno de los siete productos agrícolas (café, cacao, flores, aceite de palma, banano, plátano y azúcar) y los cálculos de huella hídrica (Ideam, 2015) se realiza el cálculo de los flujos de agua virtual por socio comercial. Finalmente se concluye, destacando los productos que mayor presión causan sobre el agua, como es el caso de la producción del azúcar.

MARCO TEÓRICO

Concepto de agua virtual

Los conceptos de agua virtual y huella hídrica han venido consolidándose dentro de la literatura de la economía ecológica como indicadores capaces de capturar la presión que ejerce el comercio internacional, sobre el recurso hídrico en el país de origen de los productos. A la vez que muestra la desigualdad de algunos países al comprar productos intensivos en agua (Clark. Et al 2014; Delbourg y Dinar, 2014).

El concepto de agua virtual, se define en la literatura como el agua que está contenida² dentro de un bien. Representa la cantidad de agua empleada en su proceso de producción y que por lo tanto ya no está disponible para su posterior uso (Allan 1998, Clark et al. 2014; Parada-Puig, 2012).

De esta forma, el concepto de flujos de agua virtual, se entiende como el intercambio de agua a través del comercio de bienes lo cual implica que el comercio internacional de éstos se comporte como un sistema de intercambio de servicios de agua entre países³ (Reimer, 2012). Además sirve como instrumento para la medición y gestión de los impactos ambientales del comercio internacional; y debido a la creciente escasez de agua en el mundo y a la distribución geográfica irregular de la disponibilidad del agua, permite establecer los costos de oportunidad en términos del recurso hídrico para diferentes actividades económicas. Lo anterior muestra la existencia de ventajas comparativas entre países en términos de los costos ambientales a la hora de producir productos intensivos en agua.

De lo anterior se destaca la importancia de los conceptos de huella hídrica azul y verde, puesto que permiten un mayor conocimiento del recurso al momento de llevar a cabo una gestión eficiente del mismo (Arévalo et al., 2011).

² Hace referencia a aquella empleada o consumida en el proceso de producción y que no estará ya disponible para otros fines. En el caso de productos agrícolas, será el agua evapotranspirada en el proceso de fijar carbono en la biomasa.

³La exportación del producto supone una transferencia (un "flujo") de agua virtual a otro país.

En este sentido, la huella hídrica azul se define como el agua superficial o subterránea utilizada para la irrigación de un cultivo (Gerbens-Leenes et al. 2009) y por lo tanto da cuenta del impacto de las actividades económicas sobre el recurso hídrico, mientras que la huella hídrica verde, se define como el agua lluvia que es evapotranspirada por una planta en su ciclo natural (Gerbens-Leenes et al. 2009). Por lo tanto, entre mayor sea la huella hídrica azul, mayor será el impacto ambiental del cultivo sobre el recurso hídrico mientras que a mayor huella hídrica verde, menor será la presión sobre el mismo.

Como los flujos de agua virtual dependen del comercio exterior, es importante identificar los diferentes tratados comerciales que tiene Colombia con el fin de caracterizar de manera general la dinámica comercial del país.

Tratados comerciales en Colombia

La política exterior colombiana desde principios de la década de los 90, ha promovido la apertura comercial por lo cual se han firmado en los últimos años tratados comerciales con el fin de promover el crecimiento del empleo y la economía (Hernández, 2014). En este sentido, Colombia ha firmado 18 acuerdos comerciales de los cuales 15 se encuentran vigentes y los tres restantes son los tratados con Costa Rica, Israel y Panamá, los cuales se encuentran en trámite. De estos acuerdos, ocho son tratados de libre comercio y siete son acuerdos comerciales que contemplan en su mayoría desgravaciones parciales⁴.

Entre los tratados de libre comercio vigentes, se encuentran los de México, Estados Unidos, Canadá, la Unión Europea, la Alianza del Pacífico⁵, Corea y con los países centroamericanos (El Salvador, Guatemala y Honduras). De estos, se destacan los acuerdos comerciales con Estados Unidos, Canadá, la Unión Europea y la Alianza del Pacífico (Alianza del Pacífico, 2014) ya que es en estos países donde se concentran las exportaciones de bienes agrícolas de origen colombiano (Trademap, 2015)⁶.

Modelo Dinámico de Sistemas-MDS

Para conocer la interacción entre el comercio internacional y el recurso hídrico, se tomó en cuenta un modelo computacional de dinámica de sistemas, en el marco de la economía compleja; la cual consiste en mirarla como una gran red de relaciones entre agentes económicos, los cuales crean patrones a partir de agregados como los precios, las cantidades producidas y exportadas.

Estos patrones cambian constantemente debido a las respuestas de cada uno de los agentes, a través del tiempo, dando origen a un proceso de cambio endógeno, fuera de equilibrio, histórico dependiente y sensible al estado inicial del sistema (Holland, 1992; Sterman, 2000; Mitchell, 2009; Arthur, 2013).

Adicional a estas características, los sistemas dinámicos complejos contienen variables "stock" y de flujo⁷, las cuales interactúan dentro de una estructura interconectada que posee retroalimentaciones positivas y/o negativas y cuyos efectos, en algunos casos, se encuentran separados por varios periodos de tiempo, creando relaciones no lineales dentro del sistema, lo que implica que la estructura de las relaciones sea determinante en el comportamiento del sistema (Forrester, 1961; Sterman, 2000; Beinhooker, 2006; Arthur, 2013).

En ese sentido, los MDS son herramientas metodológicas creadas con el fin de modelar las variables y los agentes que componen un sistema complejo y comprender el comportamiento de este (Forrester, 1961), los cuales comenzaron con el fin de modelar y estudiar los procesos de producción y de administración empresarial (Forrester, 1961; Sterman, 2000) y han venido implementándose en la modelación y pronóstico de mercados e industrias (Lyneis, 2000; Santa-Eulalia et al. 2011; Akhwanzada et al., 2012) así como a proyecciones y manejo de recursos hídricos y ambientales (Guo et al., 2001; Dyson y Chang, 2005; Wang et al., 2011; Du et al., 2011).

En estos diferentes estudios, los modelos de proyección a través de MDS han mostrado ser más confiables que los modelos estocásticos, ya que los primeros dan cuenta de la estructura mientras los segundos toman los valores futuros de una variable como una función de sus valores pasados sin intentar dar cuenta de la estructura que subyace a estos datos y por lo tanto, permiten analizar los cambios estructurales que se puedan dar debido a las oscilaciones y rezagos dentro del sistema (Lyneis, 2000).

Teniendo en cuenta las características de los sistemas complejos, no resulta difícil argumentar que el comercio internacional es uno de estos sistemas: una red conformada por un número considerable de agentes que interactúan de manera voluntaria a través del intercambio de mercancías, creando patrones de consumo y precios.

⁴ Tomado de <http://www.tlc.gov.co/>

⁵ La Alianza del Pacífico la conforman los países de la EFTA (Asociación Europea de Libre Comercio, por sus siglas en inglés) cuyos miembros son Noruega, Suiza, Liechtenstein e Islandia.

⁶ www.trademap.org.co. Página de estadísticas relacionadas con el comercio internacional.

⁷ Las variables flujo, expresadas en relación a un periodo de tiempo, y variables stock, referidas a un momento concreto.

METODOLOGÍA

Para conocer los flujos de agua virtual azul y verde, se debe calcular primero la huella hídrica (azul y verde) por tonelada (Ecuación 1).

Ecuación 1.

$$HH_i(m^3/ton) = \frac{HH_i(m^3/año)}{Producción(ton/año)}$$

Luego con esta huella se estima el flujo de agua virtual, multiplicándola por las cantidades exportadas (Ecuación 2)

Ecuación 2.

$$FAV_i(m^3/año) = HH_i(m^3/ton) * Exportación(ton/año)$$

Donde el subíndice i representa el tipo de agua (verde o azul), HH la huella hídrica y FAV los flujos de agua virtual.

De acuerdo a las anteriores ecuaciones, para calcular los flujos de agua virtual al año 2022, son necesarias las proyecciones de la huella hídrica, la producción y las exportaciones.

En el caso de las proyecciones de la huella hídrica (Tabla 1 y 2) y de la producción (Tabla 3), se tomaron los resultados del Estudio Nacional del Agua 2014 (IDEAM, 2015).

En la Tabla 1 se observa la huella hídrica azul⁸ para los siete cultivos definidos en el 2012 y la proyección al 2022.

Tabla 1. Huella hídrica azul (Millones de m³).

Cultivo	2012	2022
Banano	238,2	343,3
Cacao	119,4	949,6
Caña de Azúcar	774,9	2.968,9
Palma de Aceite	975,7	6.564,1
Plátano	938,3	852,5
Flores y Follajes ⁹	56,1	97,2

Fuente: (IDEAM, 2015)

En la Tabla 2 se observa la huella hídrica verde para los siete cultivos en el 2012 y la proyección al 2022.

Tabla 2. Huella hídrica verde (Millones de m³).

Cultivo	2012	2022
Banano	933,2	1.345,1
Cacao	1.261,0	10.030,3
Café	11.822,3	24.845,4
Caña de Azúcar	6.018,3	21.501,9
Palma de Aceite	5.928,9	39.886,8
Plátano	5.381,5	4.889,7
Flores y Follajes	39,2	49,0

Fuente: (IDEAM, 2015)

En la Tabla 3 se observa la producción para los siete cultivos en el 2012 y la proyección al 2022¹⁰.

Tabla 3. Producción en el 2012 y la proyección al 2022 (Toneladas).

Cultivo	2012	2022
Banano	2.120.326	3.056.000
Cacao	96.181	765.071
Café	622,283	1.308.776
Caña de Azúcar ¹¹	20.836.972	23.404.738
Palma de Aceite	1.150.311	7.838.720
Plátano	3.201.475	2.908.869
Flores	225.814	254.818

Fuente: (IDEAM, 2015)

Para las proyecciones de las exportaciones, se implementó un modelo de dinámica de sistemas, el cual se desarrolló por medio del software Vensim con el fin de modelar la estructura de las exportaciones de los siete productos agrícolas seleccionados¹².

En este modelo se utilizaron seis variables: PIB, Población, Precio internacional¹³ real en USD FOB, la producción proyectada, las importaciones y exportaciones (Tabla 4).

⁸ El café no tiene asociado huella hídrica azul porque se considera un cultivo de secano.

⁹ Dentro de las flores y follajes se consideran aquellas relacionadas con flores de campo y de invernadero.

¹⁰ Los datos de producción para el 2012, se hallan a partir de las Evaluaciones Agropecuarias-EVAS del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

¹¹ Producción proyectada de azúcar en Colombia de la FAPRI (Food and Agricultural Research Institute).

Tabla 4 . Variables utilizadas en el modelo Vensim.

Descripción	Fuente
Producto interno bruto per cápita	Banco Mundial
Población ¹⁴	
Precio internacional real USFOB	FAO
Producción (Toneladas) para el periodo 2013-2022 por cultivo	IDEAM
Importaciones colombianas (Toneladas)	TradeMap
Importaciones colombianas (Toneladas)	

Fuente: Elaboración propia.

La estructura del modelo se divide en cuatro “clústers” de variables con el fin de hacer explícitas las relaciones que ocurren entre las variables.

Clúster variables globales

Este clúster agrupa las tasas de crecimiento proyectadas de las variables PIB, población y precio para el periodo 2013-2022 (Tabla 5), las cuales fueron insumo para calcular la tasa de crecimiento de las exportaciones de cada cultivo.

Tabla 5. Tasas de crecimiento de PIB, N y P para aceite de palma, azúcar, banano, plátano, cacao y café.

Cultivo	PIB	N	P
Palma de Aceite	0,1 %	0,1 %	11,0 %
Azúcar	2,0 %	1,0 %	2,0 %
Banano y Plátano ¹⁵	0,9 %	0,5 %	2,0 %
Cacao	1,0 %	0,6 %	7,0 %
Café	0,9 %	0,4 %	18,3 %

Fuente: (IDEAM, 2015)

Clúster tasa de crecimiento

Se compone de los parámetros estimados del PIB, población, precio y tasa de crecimiento de las exportaciones hacia cada uno de los países de destino comercial.

Los parámetros para cada país fueron previamente estimados econométricamente y son multiplicados por los cambios porcentuales de cada una de estas variables, los cuales al sumarse crean la tasa de crecimiento de las exportaciones a cada país.

Es decir, la tasa de crecimiento de cada una de las variables es ponderada por los parámetros estimados para cada país, lo que genera que cada una de las tasas de crecimiento de las exportaciones a cada país sea diferente.

Clúster exportaciones

El clúster de exportaciones se compone de la tasa de crecimiento de las exportaciones por país, las exportaciones por país, la cuota de exportaciones y las exportaciones totales.

La variable *exportaciones* muestra el aumento en toneladas cada año y depende de la tasa de crecimiento y de las exportaciones del año anterior y está acotada por las exportaciones potenciales por país, la cual se definirá más adelante.

La variable *exportaciones totales* es la primera variable de interacción del modelo. Esta variable se compone de la suma de las exportaciones de cada uno de los socios comerciales por producto.

Por último, la variable cuota de exportaciones representa la segunda variable de interacción, pues define la participación de cada uno de los países en el total, la cual influirá en los límites de crecimiento de las exportaciones a cada país.

Clúster producción

Este clúster agrupa las variables: *Exportaciones potenciales* y *Exportaciones potenciales por país*. La primera representa la cantidad de exportaciones que Colombia puede realizar de cada producto y por lo tanto es la variable que controla el crecimiento de dichas exportaciones.

¹² El cálculo de las proyecciones de las flores y follajes se realizó de manera tendencial debido a que no se contaba con la información suficiente para poder realizar las estimaciones.

¹³ Precio internacional real USD FOB (Free on board).

¹⁴ La variable N: población, se incluye en relación a la demanda que ejerce sobre los diferentes productos. En la medida en que ésta crezca o disminuya, probablemente aumente o disminuya el consumo del producto.

¹⁵ Las tasas de crecimiento de las variables para el plátano y el banano, son iguales debido a que los países a los que se exportan estos dos cultivos son los mismos: La Unión Europea y Estados Unidos. Adicionalmente, la fuente de los datos de la variable precio (Trademap) define en una sola categoría “Bananos y Plátanos”.

La razón de esta variable radica en que no se consideran las re-exportaciones¹⁶ como exportaciones. En este sentido, las exportaciones son una parte de la producción y por lo tanto, el máximo de estas será la producción interna.

La segunda variable representa la cuota potencial que cada país importador tiene respecto a cada bien colombiano exportado. En otras palabras, representa el máximo de cantidades que puede crecer las exportaciones a cada país importador teniendo en cuenta su cuota de mercado.

De acuerdo a esto, esta variable tiene dos funciones: en primer lugar sirve de variable techo por país y a la vez, sirve como mecanismo de interacción y refuerzo ya que entre mayor sea la cuota de importaciones de un país, mayor será el límite al que pueden crecer las exportaciones a ese país, lo que le dará mayor posibilidad de que sus importaciones crezcan, aumentando su cuota de mercado y por lo tanto, teniendo mayores posibilidades de que las exportaciones a dicho país importador crezcan.

Sin embargo, esto no implica que esta variable sea la más relevante porque este proceso de retroalimentación positiva dependerá de la tasa de crecimiento del PIB del país, la de los otros países y de la situación inicial del comercio internacional.

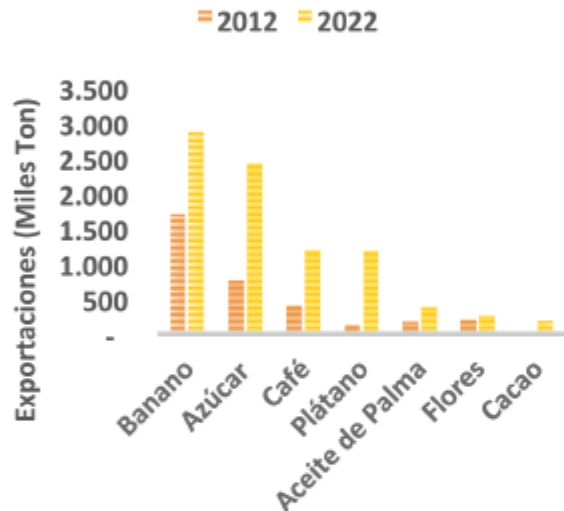
Resultados

El análisis de los resultados primero se desarrolla en torno a las proyecciones al 2022 de las exportaciones y luego en torno a los flujos de agua virtual verde y azul, por producto y socio comercial.

Los resultados del modelo muestran que al 2022 se esperan crecimientos importantes para el azúcar, banano, plátano y café. En el caso del azúcar se observan que pueden ser alrededor de los 2,5 millones de toneladas, el plátano y el café alrededor de los 1,2 millones de toneladas y el banano alrededor de los 2,9 millones de toneladas (Gráfica 1 y Gráfica 2).

Una vez realizadas las proyecciones de las exportaciones, se incorporaron en la Ecuación 2 junto con los datos de producción proyectada, huella hídrica y el análisis de los socios comerciales, para así realizar los cálculos de los flujos de agua virtual.

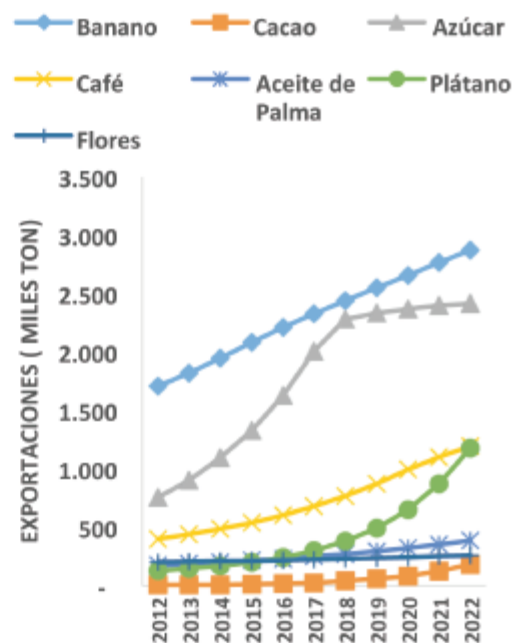
Gráfica 1. Exportaciones en el 2012 y proyectadas al 2022 para los cultivos priorizados¹⁷.



Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 3 se puede evidenciar que el producto que mayor huella hídrica azul presenta es el aceite de palma, seguido del plátano y azúcar. Sin embargo, los cultivos de flores y follajes y banano son los que presentan una mayor proporción del agua virtual azul en relación a la huella hídrica azul (89 % y 61 % respectivamente), es decir exportan mayor cantidad de agua en relación de los demás productos analizados.

Gráfica 2. Exportaciones proyectadas desde el 2013 al 2022 para los cultivos priorizados.

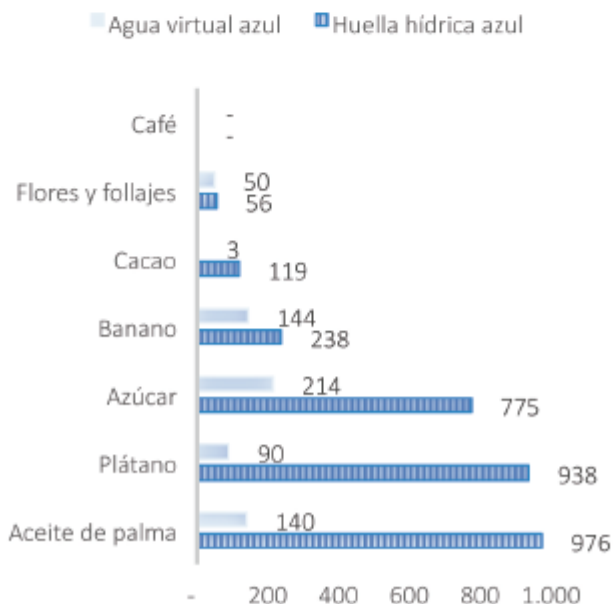


Fuente: Elaboración propia.

¹⁶ Exportaciones cuyo país, tanto de origen como de destino, no es Colombia pero que se envían desde territorio colombiano.

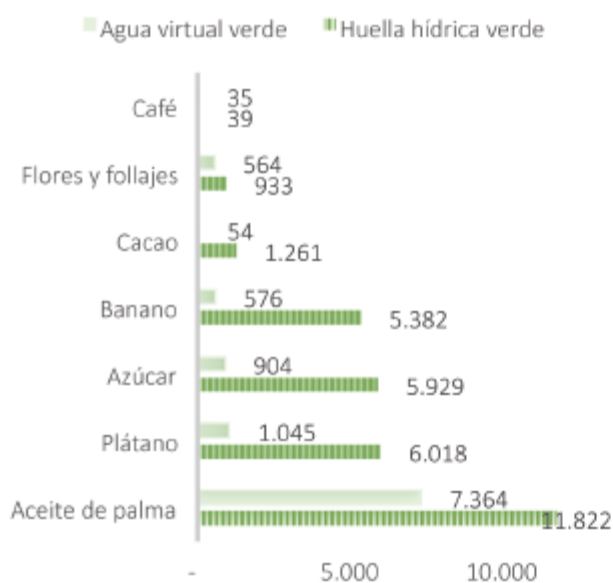
¹⁷ Los datos de exportación están relacionados con el aceite de palma exportado. Se emplea el factor de producto (fp) para convertir el aceite exportado en fruta de palma equivalente. fp=0,19=ton aceite de palma crudo/ton de fruta de palma.

Gráfica 3. Huella hídrica azul y Agua virtual azul 2012 (Millones de m³) para los cultivos priorizados.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 4. Huella hídrica verde y Agua virtual verde 2012 (Millones de m³) para los cultivos priorizados.



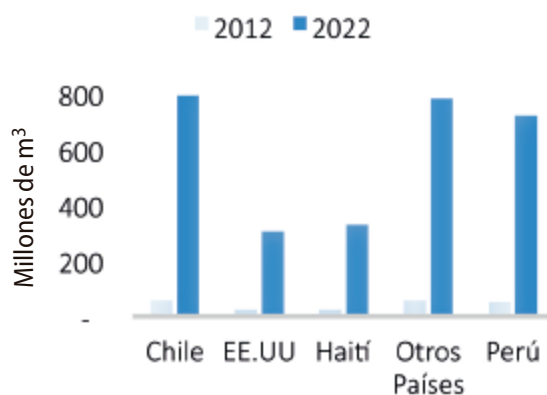
Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 4 se puede evidenciar que el producto que mayor huella hídrica verde presenta es el aceite de palma, seguido del plátano, azúcar y banano. Sin embargo, el café, el azúcar y la palma de aceite son los que presentan una mayor proporción del agua virtual verde en relación a la huella hídrica verde (89%, 62% y 60%) respectivamente), es decir exportan mayor cantidad de agua verde en relación de los demás productos analizados.

En general para los bienes analizados, la mayor parte del agua que se exporta es verde. Lo anterior implica bajos costos de oportunidad en el uso del recurso hídrico para las actividades de producción de estos bienes, otorgándole una ventaja comparativa a Colombia en términos del uso del recurso hídrico.

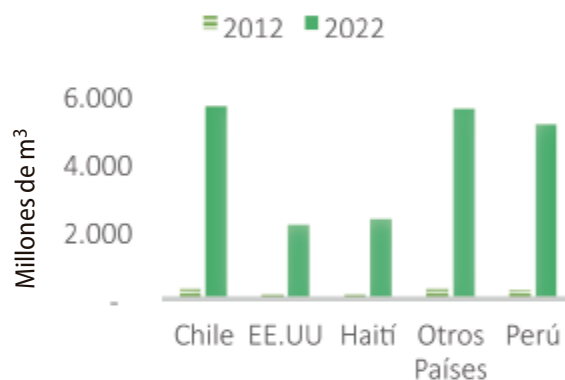
Sin embargo, con el fin de observar la presión que podría ejercer al 2022 la dinámica del comercio internacional sobre el recurso hídrico colombiano, se desagrega el flujo de agua virtual azul y verde a nivel de producto y por socio comercial.

Gráfica 5. Flujo de agua virtual azul del azúcar (Millones de m³) por socio comercial 2012-2022



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 6. Flujo de agua virtual verde del azúcar (Millones de m³) por socio comercial 2012-2022



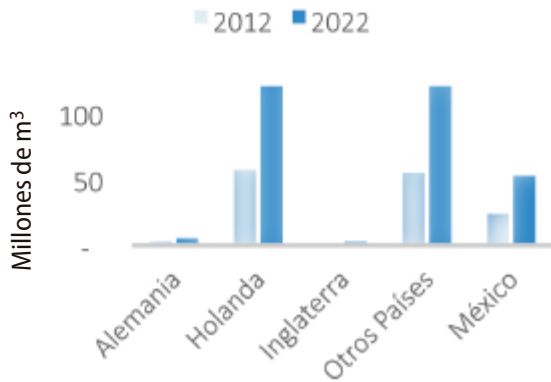
Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos 5 y 6 muestran que la mayor parte del flujo de agua virtual del azúcar es verde y se dirige principalmente hacia Chile seguido por Haití, Perú y Estados Unidos.

Los gráficos 7 y 8 muestran que para el aceite de palma, la mayor parte del flujo de agua virtual es verde la cual, se dirige principalmente a Holanda, México y otros países.

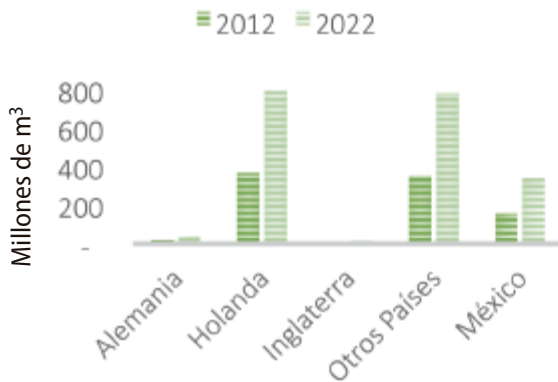
Los gráficos 9 y 10 muestran que la mayor parte del flujo de agua virtual del banano es verde, la cual se dirige con cantidades relativamente iguales a Estados Unidos y a Europa.

Gráfica 7. Flujo de agua virtual azul del aceite de palma (Millones de m³) por socio comercial 2012-2022



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 8. Flujo de agua virtual verde del aceite de palma (Millones de m³) por socio comercial 2012-2022



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 9. Flujo de agua virtual azul del banano (Millones de m³) por socio comercial 2012-2022



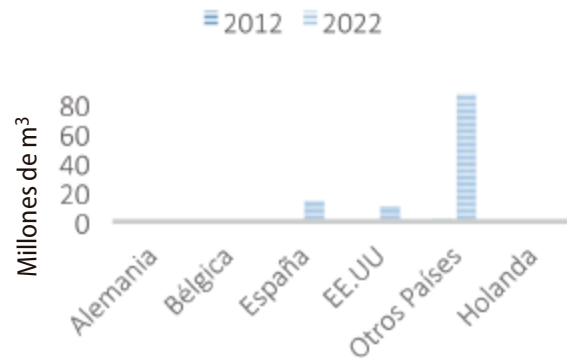
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 10. Flujo de agua virtual verde del banano (Millones de m³) por socio comercial 2012-2022



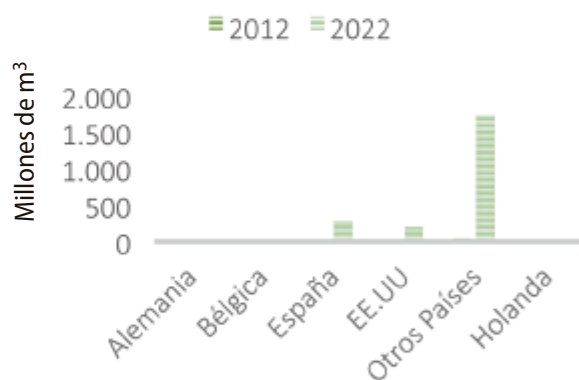
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 11. Flujo de agua virtual azul del cacao (Millones de m³) por socio comercial 2012-2022



Fuente: Elaboración propia.

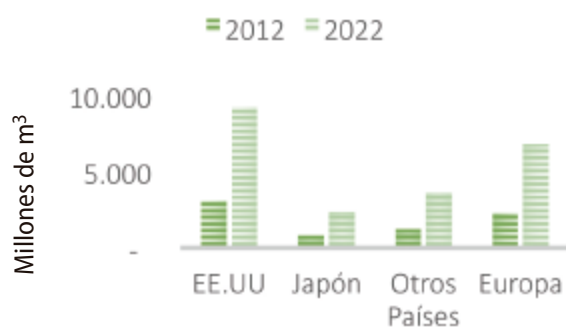
Gráfica 12. Flujo de agua virtual verde del cacao (Millones de m³) por socio comercial 2012-2022



Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos 11 y 12 muestran que la mayor parte del flujo de agua virtual del cacao es verde mientras que el flujo de agua azul es pequeño en comparación con los demás productos. Los principales destinos del flujo de agua virtual son Estados Unidos, España, y otros países.

Gráfica 13. Flujo de agua virtual verde del café (Millones de m³) por socio comercial 2012-2022



Fuente: Elaboración propia.

Cabe resaltar que en el caso del café, solo se presentan los flujos de agua virtual verde ya que el cultivo de café en Colombia no tiene riego. El principal destino del flujo de agua virtual verde es Estados Unidos. A este le sigue, en orden de importancia, Europa y Japón (Gráfico 13).

Gráfica 14. Flujo de agua virtual azul del plátano (Millones de m³) por socio comercial 2012-2022



Fuente: Elaboración propia.

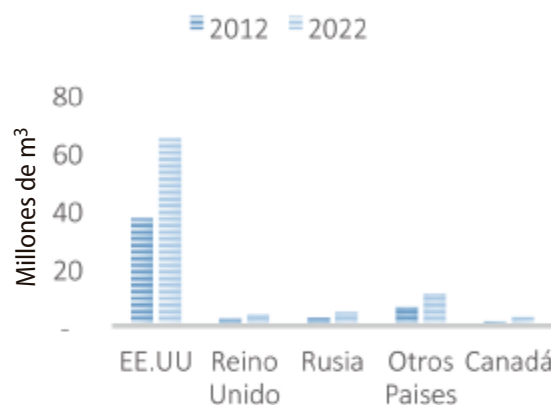
Gráfica 15. Flujo de agua virtual verde del plátano (Millones de m³) por socio comercial 2012-2022



Fuente: Elaboración propia.

Al igual que los anteriores productos, el flujo de agua virtual del plátano es en su gran parte verde y está dirigido principalmente a Europa y Estados Unidos (Gráfico 14 y 15).

Gráfica 16. Flujo de agua virtual azul de las flores y follajes (Millones de m³) por socio comercial 2012-2022



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de las flores, el flujo de agua virtual es en su gran parte azul y está dirigido principalmente Estados Unidos (Gráfico 16 y 17).

Gráfica 17. Flujo de agua virtual verde de las flores y follajes (Millones de m³) por socio comercial 2012-2022



Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

El modelo de dinámica de sistemas del comercio internacional para el aceite de palma, azúcar, banano, plátano, cacao, café y las flores y follajes, muestra en general un incremento de las exportaciones hacia el año 2022, lo que implica un aumento en general del flujo de agua virtual tanto verde como azul hacia el exterior a través de estos productos.

Este flujo de agua virtual al 2022, se caracteriza por ser en su mayoría agua virtual verde (93 % del total) y por lo tanto no se hace necesario una gran infraestructura de riego para abastecer las necesidades de los productos. Debido a esto, Colombia posee una ventaja comparativa en términos del uso del recurso hídrico en la producción de estos siete bienes agrícolas.

Adicionalmente, el modelo desarrollado encuentra que al 2022, la mayor parte del agua virtual azul se encuentra en el azúcar cuyas exportaciones, según se proyectan, tendrán como principal destino el mercado chileno y por lo tanto será la dinámica de la economía chilena y el comportamiento del mercado internacional del azúcar, los que definan la mayor presión que se ejercerá sobre el recurso hídrico especialmente en las zonas del Valle del Cauca en donde se concentra la producción de ésta.

Finalmente, el modelo de dinámica de sistemas presentado es una herramienta muy útil para la modelación de redes de interacciones tales como el comercio internacional.

BIBLIOGRAFÍA

- Akhwanzada, S. A., & Tahar, R. M. (2012). Strategic forecasting of electricity demand using system dynamics approach. *International Journal of Environmental Science and Development*, 328-333.
- Alianza del Pacífico. (2014). Documentos VIII Cumbre de la Alianza del Pacífico . Cartagena.
- Allan, J. A. (1998). Virtual Water: A Strategic Resource: Global Solutions to Regional Deficits. *Groundwater*, 545-546.
- Arévalo, D., Lozano, J., & Sabogal, J. (2011). Estudio nacional de huella hídrica Colombia sector agrícola.
- Arthur, W. B. (2013). *Complexity Economics: A New Framework for Economic Thought*. Working Paper Santa Fe Institute.
- Beinhocker. (2006). *The Origin of Wealth: Evolution, complexity and the radical remaking of economics*. Boston: Harvard Business School Press.
- Clark, S., Sarlin, P., Sharma, A. (2014). Increasing dependence on foreign water resources? An assesment of trends in global virtual water flow using a self-organizing time map . *Ecological Informatics*, 1-11.
- Delbourg, E., & Dinar, S. (2014). The Globalization of Virtual Water Flows: Explaining the Trade Patterns of a Scarce resource. 1-46.
- Du, J., Xu, L., Wang, S., & Yang, F. (2011). Simulation of Urban Ecological Water Demand Using Multi-objective System Dynamic Model. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 143-146.
- Dyson, B., & Chang, N. B. (2005). Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling. *Waste management*, 669-679.
- Forrester, J. (1961). *Industrial Dynamics*. MIT Press.
- Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A. Y., & van der Meer, T. H. (2009). The water footprint of bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 10219-10223.
- Guo, H. C., Liu, L., Huang, G. H., Fuller, G. A., Zou, R., & Yin, Y. Y. (2001). A system dynamics approach for regional environmental planning and management: a study for the Lake Erhai Basin. *Journal of Environmental Management*, 93-111.
- Hernández, Gustavo (2014). Una revisión de los efectos del Tratado de Libre Comercio entre Colombia y Estados Unidos. *Lecturas de Economía - No. 80*. Medellín, enero-junio 2014
- Holland, J. H. (1992). *Complex Adaptative Systems*. Daedalus, 17-30.
- Ideam (2015). Evaluación multisectorial de la huella hídrica en Colombia. Resultados por subzonas hidrográficas en el marco del Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá.
- Lyneis, J. M. (2000). System dynamics for market forecasting and structural analysis. *System Dynamics Review*, 3-25.
- Mitchell, M. (2009). *Complexity a Guided Tour*. Oxford University Press.
- Parada-Puig, G. (2012). El agua virtual: conceptos e implicaciones. *Orinoquía*, 69-76.
- Reimer, Jeffrey J. (2012). On the economics of virtual water trade. *Ecological Economics*. (75) Pág. 135–139
- Santa-Eulalia, L. A., Neumann, D., & Klasen, J. (2011). A Simulation-Based Innovation Forecasting Approach Combining the Bass Diffusion Model, the Discrete Choice Model and System Dynamics: An Application in the German Market for Electric Cars. In *SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*, 81-87.
- Sterman, J. D. (2000). Learning in and about complex systems. En J. D. Sterman, *Business Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a Complex World* (págs. 1-39). Boston: McGraw-Hill.
- Wang, X. J., R. M., Elmahdi, A., & Elsayah, S. (2011). Water resources planning and management based on system dynamics: a case study of Yulin city. *Environment, development and sustainability*, 331-351.
- Xiao-Jun, W., Jian-Yun, Z., Elmahdi, A., Rui-Min, H. E., LI-RU, Z., & Feng, C. (2011). Water demand forecasting under changing environment: a System Dynamics approach. *IAHS-AISH publication*, 259-266.

5

**CUANTIFICACIÓN
DE LA HUELLA
HÍDRICA POR LA
MINERÍA DE
MATERIALES PARA
LA CONSTRUCCIÓN,
EN LA CUENCA DEL
RÍO PORCE
(COLOMBIA)**

CUANTIFICACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA POR LA MINERÍA DE MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN, EN LA CUENCA DEL RÍO PORCE (COLOMBIA)

Autores:

- **Verónica Valencia.**
Universidad de Medellín
vvalenciag@udem.edu.co
 - **Luis Montoya.**
Universidad de Medellín
ljmontoya@udem.edu.co
 - **Juan González.**
Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia-CTA
juangp83@yahoo.com.mx
-

RESUMEN

En este trabajo se presenta el cálculo de la huella hídrica de la cuenca del río Porce (Antioquia, Colombia) generada por la explotación y beneficio de arenas, gravas y arcillas, con base en información recolectada entre los años 2005 y 2011. Se estimó una huella hídrica azul de 3 millones de m³ de agua y una huella hídrica gris de 2.722 millones de m³ de agua para el año típico de estudio. Los resultados obtenidos sugieren que se debe optimizar la utilización del recurso hídrico en los procesos de extracción y beneficio presentes en esta actividad minera con el fin de reducir la huella hídrica, para ello se sugieren algunas estrategias.

Palabras claves: huella hídrica, minería, materiales de construcción, río Porce.

ABSTRACT

This study calculates the water footprint from Porce's river basin (Antioquia, Colombia), originated by strip mining of gravel, sand and clay, it was based on data collected between 2005-2011. The blue water footprint at the basin was 3 millions of m³ and the gray water footprint was 2.722 millions of m³. The results suggest that it is necessary optimizing the use of water in the processes of extraction and processing for mining activity in the basin, for that different strategies are proposed.

Key words: water footprint, mining, construction materials, Porce river basin.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de las fuentes de agua es uno de los principales problemas ambientales que se derivan de las actividades mineras. Esta se produce cuando se descargan aguas residuales resultantes de los procesos de extracción y/o beneficio y por la lixiviación y erosión en las zonas de explotación de materiales, generada por la escorrentía e infiltración de las aguas lluvias sobre las áreas de suelo que quedan desprotegidas después de la explotación. Generalmente, el agua que se descarga después de los procesos mineros tiene alta concentración de sólidos suspendidos y otros contaminantes (Chernaik, 2010) y pueden generar impactos significativos en las fuentes de agua superficiales o subterráneas.

Estos efectos negativos se pueden trasladar a sitios muy alejados de los puntos de descarga o explotación, cuando los contaminantes son arrastrados por las corrientes. (Díaz & Fernández, 2007; Ramírez, 2008; Saviour, 2012) produciendo cambios en las condiciones hidráulicas de los cauces receptores, efectos tóxicos sobre los peces, alteración del pH del agua o del suelo, arrastre de metales pesados, entre otros, también se han reportado los drenajes ácidos que se producen cuando en la extracción minera las rocas tienen altos contenidos de pirita que al encontrarse expuesta a la acción del aire y agua, forman ácidos capaces de disolver metales, que se convierten en lixiviados con altas concentraciones de hierro, sulfato y metales tóxicos solubles (Johnson & Hallberg, 2005; Naicker, Cukrowska, & McCarthy, 2003; Sheoran, Sheoran, & Choudhary, 2010).

Contar con indicadores que permitan valorar el impacto de las actividades mineras es importante para la gestión del recurso hídrico. Existen diferentes indicadores de consumo de agua como lo son el indicador de Falkenmark (Chernaik, 2010), el indicador de escasez física y económica (Seckler, 1998), el índice de pobreza de agua (Sullivan, Meigh, & Giacomello, 2003) y el índice de la vulnerabilidad del agua (Raskin, Gleick, Kirshen, Pontius, & Strzepek, 1997). Un enfoque novedoso es el indicador de la huella hídrica, que no solo se concentra en el estado del agua desde una perspectiva exclusiva del consumo de agua superficial, sino que además tiene en cuenta el consumo de agua subterráneo, la humedad del suelo y la contaminación generada al recurso hídrico (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2009).

El indicador de huella hídrica fue desarrollado por Hoekstra (Hoekstra, 2003) y se basa en un desarrollo más amplio de dos conceptos formulados, uno de ellos, el concepto de agua virtual propuesto por Allan (Allan, 1998) y el concepto de agua verde, propuesto por

La huella hídrica permite cuantificar el agua usada tanto directa como indirectamente en la cadena de producción de bienes y servicios de consumo, brindando información relacionada con el agua y los hábitos de vida de las personas. Cuando se aplica la huella hídrica para una cuenca se puede hacer un análisis del consumo de agua teniendo en cuenta su origen y la capacidad de las fuentes hídricas de asimilar la contaminación generada (Hoekstra et al., 2009). Además, permite identificar las principales actividades económicas que causan presión a los recursos hídricos en una determinada cuenca o región, por lo que es una herramienta útil para definir impactos sobre el recurso hídrico causados por hábitos de consumo (Arévalo-Urbe, 2012).

Los componentes de la huella hídrica son i) la huella hídrica azul (HHA) que hace referencia al agua que se consume en un determinado proceso, ii) Huella Hídrica Verde (HHV) se refiere al agua lluvia (precipitación) que no se convierte en escorrentía superficial y no hace parte de la recarga de acuíferos, es la humedad que queda retenida en el suelo y que principalmente es aprovechada por las coberturas naturales tales como cultivos, bosques naturales y/o plantaciones forestales y iii) la Huella Hídrica Gris (HHG) que es un volumen teórico de agua necesario por un cuerpo receptor para diluir o asimilar una carga contaminante de determinada sustancia vertida y alcanzar las concentraciones establecidas por la normatividad para el lugar de estudio.

Adicionalmente, la huella hídrica puede ser aplicada a un área geográficamente delimitada como lo es la cuenca hidrográfica (Hoekstra et al., 2009), tal es el caso de aplicación de la huella hídrica azul y verde en la cuenca del Guadalquivir (Salmoral et al., 2012), en la cual se tuvieron en cuenta además criterios sociales y económicos, y la aplicación de la huella hídrica azul y verde, además del agua virtual en la cuenca del río Amarillo en China (Feng, Siu, Guan, & Hubacek, 2012). En cuanto a las actividades mineras, se han encontrado algunas experiencias en (Echeverri, 2014; Garcés Valenzuela, 2011; González Valencia, Montoya, Botero, Arévalo, & Valencia, 2012).

METODOLOGÍA

La cuenca del río Porce está localizada en el departamento de Antioquia, sobre la cordillera central colombiana, con altitudes que oscilan entre los 80 msnm y los 3340 m.s.n.m., con un área de 5.248 km² (Arévalo-Urbe, 2012).

La actividad de extracción de materiales de construcción se encuentra localizada en la parte alta de la cuenca (al sur de la cuenca), (Figura 1), en los municipios de Medellín, Copacabana, Girardota e Itagüí principalmente (Ponce, 2005; Posada & Sepúlveda, 2013).

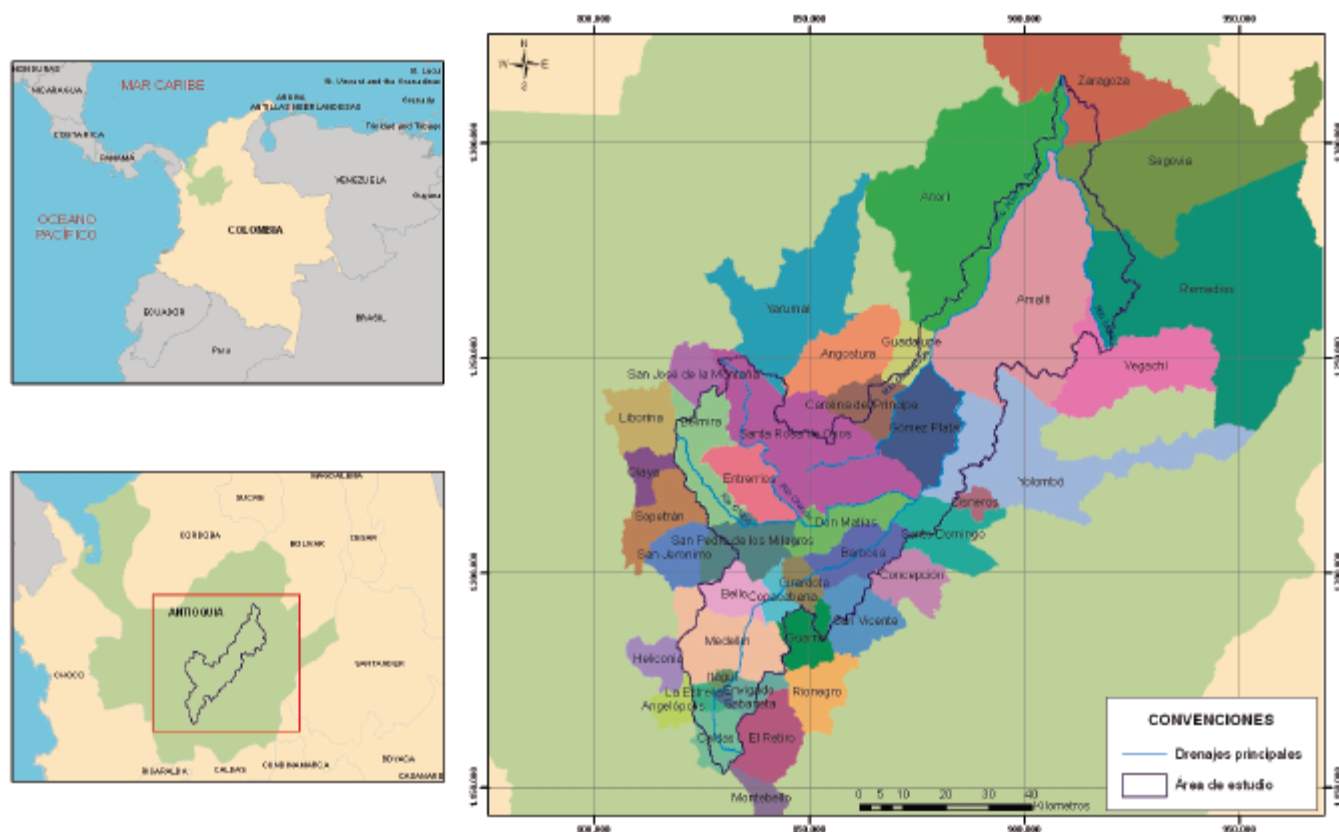


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Porce

Fuente: Arévalo-Urbe, D. et. al (2013). Resumen de resultados: Evaluación de la huella hídrica en el cuenca del río Porce, Medellín.

La extracción de estos materiales está impulsada por la creciente demanda de materiales para la construcción en las ciudades de la zona y a la disponibilidad de dichos materiales cerca a estos centros urbanos (Alcaldía de Medellín, 2010; Ramírez, 2008). Los principales tipos de extracción minera que se dan en la zona son: explotaciones de canteras donde para el desprendimiento y transporte del material se utiliza el agua, explotaciones con medios mecánicos y explotaciones aluviales (Alcaldía de Medellín, 2010).

Para el cálculo de la huella hídrica generada por la extracción minera de materiales para la construcción se utilizó la metodología propuesta por (Hoekstra et al., 2009), siguiendo los conceptos y criterios técnicos allí planteados.

Se consideró un volumen de control para toda la mina, estimando los flujos de agua a la entrada y a la salida de los procesos de extracción y beneficio, tal como se presenta en la Figura 2.

Para la determinación de los flujos de agua se realizaron visitas a un número representativo de minas existentes en la cuenca, donde a partir de encuestas se recolectó la información requerida. Se pudieron identificar los procesos, el de extracción y el de beneficio, los cuales se diferencian por los flujos de agua presentes en cada uno de ellos, en un proceso se agrupó el de extracción y beneficio de gravas y arenas y en otro la explotación de arcillas.

Para la explotación de arenas y gravas, el agua que ingresa al proceso es utilizada tanto en la extracción, como en el beneficio y un alto porcentaje del agua utilizada en estos procesos es devuelta a las fuentes hídricas cargada de sólidos suspendidos, tan solo un pequeño porcentaje del agua queda incorporado en el producto en forma de humedad del suelo y las pérdidas de agua por evaporación en el proceso son despreciables (Figura 2).

Para la explotación de las arcillas, el agua que ingresa al sistema es utilizada únicamente durante el proceso de beneficio del material, pues el proceso de extracción se realiza por medios mecánicos, donde los usos del agua para lavado de las maquinarias y otras actividades fueron considerados despreciables.

Para el proceso de beneficio de las arcillas se incorpora agua para buscar una humedad óptima requerida en el proceso, según la información recolectada en las encuestas, esta se encuentra alrededor del 22 %. Puesto que las arcillas son utilizadas para la fabricación de adobes, ladrillos y tejas, el material es sometido a procesos de amasado, extrusión, moldeado y finalmente a cocción, donde el agua incorporada es evaporada en su totalidad, convirtiéndola en un consumo de agua durante el proceso.

La huella hídrica es un indicador temporal y geográficamente específico, esto es, que debe localizarse en una región y en un tiempo específico. La huella hídrica de la minería de materiales de construcción, en la cuenca se estima como la sumatoria de la huella hídrica de cada una de las minas. Para ello sería necesario contar con la producción y los consumos de agua en cada una de estas.

Puesto que no se contaba con dicha información para el período de tiempo seleccionado, se optó por realizar una estimación de la huella hídrica a partir del

cálculo de indicadores promedios de huella hídrica estimados en un número representativo de minas, que se puedan considerar como representativas de la cuenca. De esta forma se estimó la HHA, HHV o HHG como un indicador de IHHa, IHHV o IHHG, multiplicado por la producción en la cuenca en el período seleccionado, en cuyo caso será el año 2011.

Para el cálculo de los indicadores se utilizó información comprendida entre los años 2005 a 2011, asumiendo que los indicadores derivados de dichos años también pueden ser representativos del período de estudio. Estas suposiciones son razonables puesto que tanto las técnicas como los métodos de explotación son muy similares durante este período.

A partir de (Alcaldía de Medellín, 2010; Gobernación de Antioquia, 2010; Ramírez, 2008) de la revisión de expedientes mineros y de las 10 encuestas 1 realizadas en la cuenca, se encontró que existían un total de ciento veinte empresas mineras dedicadas a la explotación de arenas y gravas y trece para la explotación de arcillas. De la información recolectada por mina de extracción de arenas y gravas, se encontró que cinco de estas tenían información suficiente para el cálculo del indicador de huella hídrica azul y trece para el indicador de huella hídrica gris.

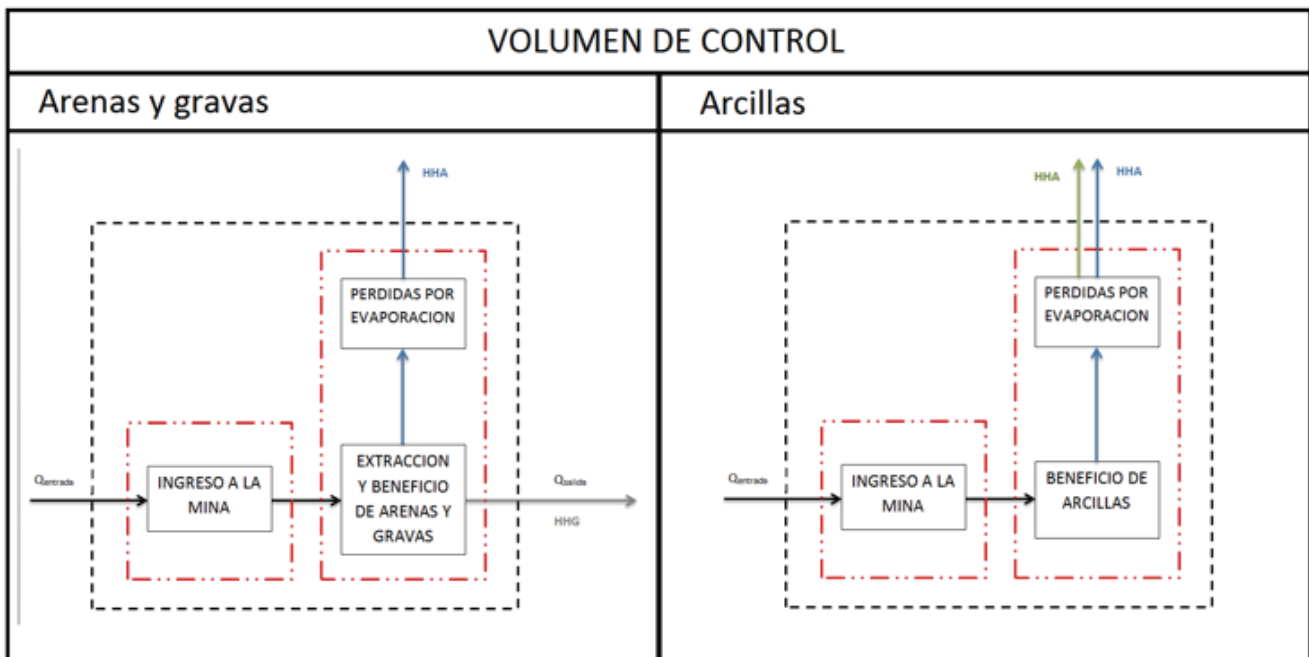


Figura 2. Volumen de control minería de materiales de la construcción arenas-gravas y arcillas.

Fuente: elaboración propia.

Para la minería de gravas y arenas, se calculó un indicador de huella hídrica azul (con los datos de cinco minas), dividiendo la diferencia entre el caudal de la entrada y el caudal de salida por la producción asociada a cada mina. El resultado de estas cinco minas se promedió y dicho valor fue 0.00039 m^3 de agua por kilogramo de material, posteriormente se utilizó este indicador para calcular la huella hídrica azul de las minas que no tenían información de caudales de entrada y de salida o datos directos del consumo de agua en el proceso productivo. Las variables utilizadas no proceden de una fuente única, se consultaron los expedientes de las autoridades ambientales y estudios del sector minero elaborados en las universidades (Ramírez, 2008).

En algunos casos para una misma mina fue necesario utilizar información de diferentes fuentes para hacer las estimaciones de huella hídrica azul. Por último, se realizaron encuestas a diez empresas, con el fin de validar la información reportada en las fuentes secundarias, sin embargo la información de las encuestas no tuvo una utilidad significativa en el estudio porque en las minas llevan un bajo control de aspectos como el consumo de agua y no tienen registros de esta información.

Para el cálculo del indicador de huella hídrica verde para la minería de arenas y gravas, se asumió que el producto permanecía con una humedad de alrededor del 6 % (dato obtenido de las encuestas realizadas), cercano a la humedad con la que se extraen estos materiales, con lo que el indicador de huella hídrica verde utilizado fue de $0.00006 \text{ m}^3/\text{kg}$ de material.

Para el cálculo del indicador de huella hídrica gris se utilizó la concentración de carga de sólidos suspendidos totales y caudal a la entrada y a la salida de las minas, valores obtenidos de los expedientes mineros y de las metas de reducción de carga contaminante globales y por usuario (CORANTIOQUIA, 2008).

Las concentraciones máximas permisibles utilizadas fueron las reportadas por (Boulay, Bulle, Deschênes, & Margni, 2011) y las condiciones de concentración natural en la cuenca fueron asumidas según lo reportado en la zona alta de la misma (RedRío, 2009). El indicador de huella hídrica gris en cada una de las minas se obtuvo utilizando la ecuación (Chernaik, 2010). Y se calculó un promedio de los IHHG obtenidos para las 13 minas que contaban con la información suficiente. El indicador de huella hídrica gris utilizado fue de $0.32 \text{ m}^3/\text{kg}$ de material.

Ecuación:

$$IHHG_{mina} = \frac{Carga_{SST}}{C_{SST,max} - C_{SST,nat}} \cdot Y$$

Donde,

$Carga_{SST}$ = Carga de sólidos suspendidos totales (KgSST/día)

$C_{SST,max}$ = Concentración máxima de sólidos suspendidos totales (mg/L)

$C_{SST,nat}$ = Concentración natural de sólidos suspendidos totales en la cuenca (mg/L)

Y = Producción de arenas y gravas en la mina (Kg/año)

Para la minería de arcillas, la huella hídrica azul se estimó considerando los requerimientos de agua para los procesos de beneficio, donde se debe incrementar la humedad del suelo al 22 %. Se asumió que la humedad inicial del suelo en las minas es de un 10 %, después de la extracción, por lo que el suministro de agua requerido es alrededor del 12 % restante. El indicador de huella hídrica azul para las arcillas utilizado fue de $0.00012 \text{ m}^3/\text{kg}$ de arcilla producida.

Para el cálculo del indicador de huella hídrica verde se asumió una humedad típica del suelo en la explotación del 10 %, con lo que se obtiene un indicador de huella hídrica verde de $0.00010 \text{ m}^3/\text{kg}$ de arcilla.

Para el caso de las arcillas no se calculó la huella hídrica gris, ya que según la información obtenida en visitas a las empresas mineras, para este tipo de materiales no se realizan vertimientos del proceso, debido a que toda el agua incorporada en el proceso es evaporada en la etapa de cocción.

Sin embargo, hay que mencionar que en la zona de explotación se puede presentar una carga de sólidos por efecto de la erosión generada en las áreas descubiertas en la zona de explotación, pero esta no fue considerada en la cuantificación, pues depende de los sistemas de tratamiento implementados en cada explotación individual y no fue posible obtener valores promedios de dicha descarga para las minas en la cuenca.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se presenta la estimación de la huella hídrica para la minería de materiales para la construcción en la cuenca del río Porce, en el año 2011. Para la minería de arenas y gravas se estimó una huella hídrica azul de 3.259.479 m³ para dicho período, y para la minería de arcillas la HHA fue 62.463 m³, con lo que la HHA para las gravas y arenas es 3,25 veces mayor que para las arcillas, esto se explica por el consumo masivo de agua en los procesos de extracción y beneficio en la minería de arenas y gravas, puesto que en algunas de las minas la práctica común utilizada para la extracción es el uso de monitor que implica un alto consumo de agua en el proceso, pues esta es utilizada para el desprendimiento y transporte del material a los lugares de beneficio y también se utiliza en el beneficio, para su separación y clasificación por medio de sedimentación.

Como paso inicial antes de proponer técnicas que permitan reducir los consumos de agua en la actividad minera, es necesario promover el monitoreo y seguimiento del uso y consumo del agua en cada uno de los procesos, esto se evidencia en los resultados de las encuestas donde no se tiene claridad en los consumos de agua en las diferentes etapas de extracción y beneficio de los materiales. Este monitoreo es clave para poder establecer metas de reducción y de esta manera definir las técnicas o estrategias más adecuadas a implementar. Estrategias simples como la captación de aguas lluvia para reducir la extracción de agua de las fuentes superficiales o subterráneas, la recirculación de agua en los diferentes procesos pueden ser algunas técnicas básicas a implementar.

Para la reducción de huella hídrica azul en la minería de arcillas se deben implementar estrategias para la retención de humedad del suelo en las minas, evitando de esta forma la necesidad de adicionar agua para facilitar los procesos de amasado, extrusión y moldeado.

La estimación de la huella hídrica verde generalmente ha sido estimada para evaluar las actividades agrícolas, forestales o pecuarias (Zheng, Liu, Koeneman, Zarate, & Hoekstra, 2012) evaluando los requerimientos hídricos de los cultivos (Mungkalasiri, Wisansuwannakorn, & Paengjuntuek, 2015), sin embargo, utilizando en un sentido amplio la definición de la huella hídrica verde, podría realizarse una estimación de dicha huella para el caso de las actividades mineras.

En el caso de la minería, el producto es el mismo suelo o un porcentaje de este por lo que en la estimación de la huella hídrica hay que considerar la humedad retenida en el suelo con que fue extraído el material. Esta agua, o un porcentaje de ella, extraída en forma de humedad del suelo se va contenida en el producto, y ya no estaría disponible para otros fines principalmente agrícolas.

En el caso de la minería de materiales de construcción, el suelo (o un porcentaje muy alto del mismo) es el producto en sí, por lo que hay que estimar la humedad con la que sale el material del suelo, para la evaluación de la huella hídrica verde de esta actividad. Los valores de humedad en las minas varían a lo largo de la cuenca y a lo largo del período de estudio, está muy asociado a variaciones climáticas, sin embargo se optó por utilizar un valor estimado de humedad del suelo, para el caso de las gravas y arenas del 6 % obtenido de las encuestas y para las arcillas del 10 %.

De la estimación de huella hídrica verde (HHV) para la minería de arenas y gravas se obtuvo un valor de 506.249 m³ y para la minería de arcillas 52.053 m³ para el año 2011, considerando la humedad natural del suelo, al comparar los valores de huella hídrica verde para estas actividades mineras con la huella hídrica azul se encuentra que representa un 17 % por lo que no es tan significativa en este caso, pero en otras regiones puede tener una incidencia importante en el equilibrio hídrico de un territorio.

El cálculo de la huella hídrica gris se realizó con base en la concentración de sólidos suspendidos totales (SST) en las aguas residuales de los procesos de extracción y beneficio de arenas y gravas (Tabla 1), dando como resultado un indicador de 0,18 m³ de agua necesarios para diluir la concentración de SST vertidos por la producción de un kilogramo de arenas/gravas, con el fin de que alcance la concentración permisible definida por (Boulay et al., 2011) que es de 25 mg SST/l.

Se obtuvo una HHG total de 2,722,905 millones de m³ de agua al año para diluir la concentración de SST vertidos por el sector minero de materiales de construcción, este valor nos indica la necesidad de generar estrategias para disminuir la contaminación generada por estas explotaciones mineras.

En este estudio no se tuvo en cuenta la contaminación ocasionada por la erosión hídrica en áreas desprotegidas de explotación, donde por efecto de la lluvia y de las malas prácticas son arrastrados sedimentos a las fuentes hídricas.

Tabla 1. Estimación de la huella hídrica e indicadores de huella hídrica estimados para la cuenca del río Porce en el año 2011.

	Unidades	Minería de grava y arena	Minería de arcilla
IHHA	m ³ /kg	0,00039	0,00012
IHHV	m ³ /kg	0,00006	0,0001
IHHG	m ³ /kg	0,32	
IHHA	m ³	3.259.479	62.463
IHHV	m ³	506.249	52.053
IHHG	Millones de m ³	2.722,9	

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

El indicador de huella hídrica aplicado al sector minero de extracción de arenas, gravas y arcillas es una herramienta que permite cuantificar en términos de metros cúbicos de agua el impacto generado a las fuentes hídricas por consumo y contaminación de las actividades mineras y servir como instrumento para la gestión integral del recurso hídrico.

La huella hídrica azul, especialmente en la extracción de arenas y gravas indica la necesidad de generar estrategias de gestión del recurso que permitan la optimización del uso eficiente del agua en los procesos de extracción y beneficio en esta actividad minera con el fin de reducir la presión sobre las fuentes hídricas superficiales o subterráneas y al mismo tiempo evitar conflictos por el agua entre diferentes usuarios.

En el caso de la huella hídrica verde, aunque no se conocen antecedentes de su aplicación en el sector minero, esta es una primera aproximación a sectores diferentes del agropecuario donde tradicionalmente se ha evaluado.

La extracción de materiales de construcción genera impactos en la calidad del agua, esto se ve reflejado en el indicador de huella hídrica gris, sin embargo no se ha estimado este indicador para las áreas desprotegidas que se generan en la minería.

REFERENCIAS

- Alcaldía de Medellín. (2010). Plan de parques minero industriales para el municipio de Medellín. Alcaldía de Medellín.
- Allan, J. A. (1998). Virtual water: a strategic resource.
- Arévalo-Urbe, D. (2012). Una mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica. Colombia: WWF Reporte, 48.
- Boulay, A.-M., Bulle, C., Deschênes, L., & Margni, M. (2011). LCA characterisation of freshwater use on human health and through compensation. In *Towards Life Cycle Sustainability Management* (pp. 193–204). Springer.
- Chernaik, M. (2010). Guidebook for evaluating mining project EIAs. Environmental Law Alliance Worldwide.
- CORANTIOQUIA. (2008). Consulta de metas de reducción - tasas retributivas, carga contaminante y metas de reducción por usuarios. Dirección territorial Aburra Sur.
- Díaz, A. R., & Fernández, G. G. (2007). Contaminación por erosión eólica e hídrica de las áreas limítrofes a la antigua zona minera de La Unión (Cartagena). *Revista Murciana de Antropología*, (14), 77–96.
- Echeverri, X. V. (2014). Estimación de la huella hídrica en la extracción de caliza a cielo abierto y propuesta de una política de integración sostenible del recurso hídrico – caso planta Rioclaro, Argos. Medellín, Colombia.
- Falkenmark, M. (1995). Land-water linkages: a synopsis. *Land and Water Integration and River Basin Management*. FAO Land and Water Bulletin, 1, 15–16.
- Feng, K., Siu, Y. L., Guan, D., & Hubacek, K. (2012). Assessing regional virtual water flows and water footprints in the Yellow River Basin, China: a consumption based approach. *Applied Geography*, 32(2), 691–701.
- Garcés Valenzuela, M. A. (2011). Análisis técnico de la huella hídrica como indicador de sustentabilidad del uso del agua en la producción del concentrado de cobre en División El Teniente de Codelco.
- Gobernación de Antioquia. (2010). Formulación de los lineamientos de ordenación minero ambiental para los materiales de construcción en la cuenca del río Aburrá. Medellín, Colombia.
- González Valencia, J. E., Montoya, L. J., Botero, A., Arévalo, D., & Valencia, V. (2012). Aproximación a la estimación de la huella hídrica de la minería del oro en el municipio de Segovia, Antioquia (Colombia). *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología Y Humanismo*, (7), 27–44.
- Hoekstra, A. Y. (2003). Virtual water trade between nations: a global mechanism affecting regional water systems. *IGBP Global Change News Letter*, 54, 2–4.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2009). Water footprint manual: state of the art 2009. Water Footprint Network.
- Johnson, D. B., & Hallberg, K. B. (2005). Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of the Total Environment*, 338(1), 3–14.
- Mungkalasiri, J., Wisansuwannakorn, R., & Paengjuntuek, W. (2015). Water footprint evaluation of oil palm fresh fruit bunches in Pathumthani and Chonburi (Thailand). *International Journal of Environmental Science and Development*, 6(6), 455.
- Naicker, K., Cukrowska, E., & McCarthy, T. S. (2003). Acid mine drainage arising from gold mining activity in Johannesburg, South Africa and environs. *Environmental Pollution*, 122(1), 29–40.

- Ponce, A. (2005). Distritos mineros: exportaciones e infraestructura de transporte. UPME, Unidad de Planeación Minero Energética.
- Posada, V. V., & Sepúlveda, G. F. (2013). Diagnóstico minero y económico del departamento de Antioquia. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, (33), 125–134.
- Ramírez, M. I. (2008). Sostenibilidad de la explotación de los materiales de construcción en el Valle de Aburrá. Medellín, Colombia.
- Raskin, P., Gleick, P., Kirshen, P., Pontius, G., & Strzepek, K. (1997). Water futures: assessment of long-range patterns and problems. *Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world*. SEI.
- RedRío. (2009). Red de monitoreo ambiental en la cuenca hidrográfica del río Aburrá - Medellín en jurisdicción del Área Metropolitana fase III.
- Salmoral, G., Dumont, A., Aldaya, M. M., Rodríguez-Casado, R., Garrido, A., & Llamas, M. R. (2012). Análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir. *Fundación Marcelino Botín*.
- Saviour, M. N. (2012). Environmental impact of soil and sand mining: a review. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 1(3), 125–134.
- Seckler, D. W. (1998). World water demand and supply, 1990 to 2025: scenarios and issues (Vol. 19). Iwmi.
- Sheoran, A. S., Sheoran, V., & Choudhary, R. P. (2010). Bioremediation of acid-rock drainage by sulphate-reducing prokaryotes: A review. *Minerals Engineering*, 23(14), 1073–1100.
- Sullivan, C. A., Meigh, J. R., & Giacomello, A. M. (2003). The water poverty index: development and application at the community scale. In *Natural Resources Forum* (Vol. 27, pp. 189–199).
- Zheng, Z., Liu, J., Koeneman, P. H., Zarate, E., & Hoekstra, A. Y. (2012). Assessing water footprint at river basin level: a case study for the Heihe River Basin in northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8), 2771–2781.

REVISTA CÁTEDRA DEL AGUA

SOSTENIBILIDAD HÍDRICA

Uso de la huella hídrica como herramienta de apoyo a la gestión integral de los recursos hídricos.



LÍNEA DE AGUA Y
MEDIO AMBIENTE

