



GUÍA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA





GUÍA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA

2017

Director de proyecto GSI
Diego Arévalo Uribe

Autores principales GSI
Érika Zárate Torres
Alex Fernández Poulussen
Derk Kuiper

Autores EUROCLIMA - IICA:
Didier Moreira
Claudio Castro
Ronny Cascante

Este documento fue preparado por GSI-LAC S.A.S, representada por el Ing. Diego Arévalo Uribe, para el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), en el marco de las actividades del Programa EUROCLIMA (CEC/10/001), con financiamiento de la Comisión Europea.

Ni la comisión Europea ni ninguna persona que actúe en nombre del IICA, es responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en esta publicación. Los puntos de vista expresados en este Estudio son de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de la Comisión Europea.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la organización.



Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2015



Guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica por IICA se encuentra bajo una Licencia Creative Commons Reconocimiento-Compartir igual 3.0 IGO (CC-BY-SA 3.0 IGO)

(<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/>)

Creado a partir de la obra en www.iica.int.

El Instituto promueve el uso justo de este documento. Se solicita que sea citado apropiadamente cuando corresponda.

Esta publicación también está disponible en formato electrónico (PDF) en el sitio Web institucional en <http://www.euroclima.iica.int>

Coordinación editorial: Ronny Cascante
Corrección de estilo: María Teresa Bolaños
Diagramación: Carlos Umaña
Diseño de portada: Carlos Umaña
Impresión: Imprenta IICA

Guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica / Erika Zárate Torres, Alex Fernández Poulussen, Derk Kuiper; Unión Europea, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. – San José, C.R.: IICA, 2017. 80 p.; 21.59 cm X 27.94 cm.

ISBN: 978-92-9248-670-9

1. Recursos hídricos 2. Uso del agua 3. Sostenibilidad 4. Ordenación de aguas 5. Cuencas hidrográficas 6. Evaluación del impacto 7. Metodología I. IICA II. Unión Europea III. Good Stuff International IV. Título

AGRIS
P10

DEWEY
333.912

San José, Costa Rica
2017

Índice

Presentación	5
1. Introducción	7
2. Bases conceptuales	9
2.1. Introducción a la evaluación de la huella hídrica	9
2.2. Los colores del agua y las huellas hídricas azul, verde y gris	10
2.3. Evaluación de la huella hídrica a nivel geográfico: la cuenca hidrográfica	13
3. Fase 1: Definición de objetivos y alcance de la evaluación de la huella hídrica	16
3.1. Introducción: ¿Por qué es importante definir los objetivos y el alcance del estudio?	16
3.2. Aspectos que deben considerarse en la definición de objetivos y alcance	16
3.2.1. Definición de objetivos	17
3.2.2. Definición del alcance	18
3.3. Consejos prácticos sobre el proceso de definición de objetivos y alcance de una evaluación de huella hídrica	21
4. Fase 2: Contabilidad de la huella hídrica	22
4.1. Introducción	22
4.2. Contabilidad de la huella hídrica para el sector agrícola	24
4.2.1. Uso consuntivo del agua: las huellas hídricas azul y verde del sector agrícola	24
4.2.2. Determinación de los componentes azul y verde de la huella hídrica de un cultivo	28
4.2.3. Contaminación del agua: la huella hídrica gris del sector agrícola	30
4.2.4. Consideraciones para la contabilización de las huellas hídricas para los diferentes sectores económicos operando en la cuenca, aparte del agrícola	31
5. Fase 3: Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica	34
5.1. Introducción: el alcance del análisis de sostenibilidad	34
5.2. Sostenibilidad ambiental	34
5.2.1. Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica azul	35
5.2.2. Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica verde	35
5.2.3. Sostenibilidad Ambiental de la huella hídrica gris	39
5.2.4. Consideraciones prácticas para el análisis de la sostenibilidad ambiental de la huella hídrica	39
5.3. Análisis de la sostenibilidad económica de la huella hídrica	41
5.4. Análisis de la sostenibilidad social de la huella hídrica	42
6. Fase 4: Formulación de estrategias de respuesta para la gestión de la huella hídrica	43
6.1. Introducción: ¿Qué son las estrategias de respuesta?	43
6.2. Estrategias de respuesta a nivel de cuenca	43
6.3. Estrategias de respuesta específicas por sector-actor	44
7. Reflexiones finales	46
8. Referencias	50
9. Anexos	54



Presentación

El proyecto EUROCLIMA-IICA, ejecutado por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), con el apoyo financiero de la Comisión Europea, busca fortalecer las capacidades de los funcionarios y técnicos del sector del ambiente y la agricultura de los países miembros, así como de otros sectores, para que tengan conocimiento y acceso a herramientas y buenas prácticas sobre agricultura, recursos naturales y cambio climático, a fin de lograr una mejor posición para adaptarse a las condiciones cambiantes del clima.

La escasez de agua y el uso ineficiente de este recurso amenazan la futura producción de alimentos en el mundo y, por lo tanto, la seguridad alimentaria y los medios de vida de millones de productores y consumidores. La agricultura es el mayor usuario de agua dulce del planeta, pues consume casi el 70 % de ella; precisan, por lo tanto, conceptos, metodologías, instrumentos y políticas que permitan racionalizar y hacer más eficiente el uso de este recurso, vital para el futuro de la humanidad. Mejorar la gestión del agua para contribuir a la adaptación de los sistemas agrícolas ante el cambio climático es un tema de importancia prioritaria para el sector agropecuario.

Cuantificar el consumo de agua y su composición (verde, azul y gris) para la obtención de nuestros bienes y servicios nos permite determinar no solo el nivel de eficiencia, sino también el impacto que se genera al medio ambiente y, lo más importante, identificar oportunidades para mejorar. Un buen conocimiento y una aplicación apropiada del concepto de la huella hídrica permitirán una mejor comprensión del impacto que la actividad agropecuaria y otros sectores están ejerciendo sobre el recurso hídrico.

Las buenas experiencias con la aplicación de la metodología de la evaluación de la huella hídrica para fortalecer la gestión y las políticas del uso del recurso hídrico en algunos países son indicativas del potencial de utilizar esta herramienta en América Latina como una metodología de evaluación. Permite identificar opciones para usar los recursos hídricos de una forma más racional, consciente, eficiente y sostenible, mejorando así la sostenibilidad ambiental, económica y social de las cuencas.

Esta guía pretende ser un documento referente que facilite la evaluación de la huella hídrica en las cuencas de América Latina. Recoge las experiencias y las lecciones aprendidas sobre la aplicación de la huella hídrica como un indicador en los diversos estudios realizados en cuencas de todo el mundo. Presenta, asimismo, algunos resultados emblemáticos desarrollados, como casos de estudio en Colombia, para explicar el uso y el potencial de la herramienta en detalle.

Este documento es resultado del trabajo que el Proyecto EUROCLIMA-IICA ha realizado para promover el manejo sostenible e integral de los recursos hídricos. Paralelamente se han elaborado estudios técnicos sobre la evaluación de la huella hídrica en las principales cuencas de América Latina en donde se está aplicando la metodología desarrollada en esta guía. Se han realizado también cursos y foros virtuales sobre el tema. Las herramientas que se han desarrollado en el marco de este esfuerzo son gratuitas y de libre acceso. Se espera que su uso le permita al sector agrícola, tanto en el ámbito público como en el privado, ejercer un menor impacto en las cuencas, estableciendo lineamientos para mejorar el uso y la gestión integral del agua, en busca de una mayor productividad agropecuaria.

David E. Williams

Especialista principal

Resiliencia y Gestión Integral de Riesgos en la Agricultura

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)



1. Introducción

El concepto de la huella hídrica se presenta por primera vez en 2002 (Hoekstra y Hung 2002); desde entonces, ha sufrido una transformación notable que continúa en plena evolución y desarrollo. La huella hídrica fue concebida inicialmente como una herramienta que permitía estimar el contenido de agua oculta en cualquier bien o servicio consumidos por un individuo o grupo de individuos de un área específica (país, ciudad, continente), en analogía con la huella ecológica, como concepto que permite analizar el impacto de los hábitos de vida y consumo de la población bajo un escenario de recursos naturales finitos (Wackernagel y Rees 1996). Actualmente, el desarrollo del concepto ha ampliado su rango de aplicación, llegando a ser una herramienta complementaria a las convencionales para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) en una cuenca.

La evaluación de huella hídrica es una metodología que promueve y apoya el uso sostenible del recurso hídrico a través de información transparente y completa sobre el consumo y la contaminación del agua, en relación con la disponibilidad de esta. La metodología fue introducida en el 2011 en el *Manual de evaluación de huella hídrica* (Hoekstra *et al.* 2011), como parte de las acciones de investigación y divulgación de la Red Internacional de Huella Hídrica¹.

Esta guía metodológica se enfoca en la aplicación de la evaluación de la huella hídrica a un área geográficamente delimitada, definida por el relieve, como lo es una unidad hidrológica: la cuenca.

Los primeros estudios de cuenca surgieron para cuencas en España, con ejemplos pioneros como el caso de la cuenca del río Guadiana (Aldaya *et al.* 2010) y del río Guadalquivir (Dumont *et al.* 2013). Otros estudios precursores en el tema son, por ejemplo, el caso de la cuenca del río Heihe en China (Zeng *et al.* 2012), la recopilación de estudios geográficos de huella hídrica realizada por UNEP (2011) y la aplicación para el área de Hertfordshire y el norte de Londres, Inglaterra (Zhang *et al.* 2014). Estos estudios mostraron con claridad la utilidad de evaluar las huellas hídricas de las cuencas, con miras a informar la formulación de estrategias para alcanzar la asignación más eficiente y sostenible posible del agua.

En los últimos años, con el apoyo de la Cooperación Suiza, se ha extendido la evaluación de la huella hídrica en cuenca en Colombia; en primer lugar, como herramienta de apoyo a los procesos participativos de gestión integrada del recurso hídrico (el caso de la cuenca del río Porce; CTA, *et al.* 2013), y en segundo lugar, como complemento a los indicadores tradicionales de gestión del recurso hídrico por cuenca a nivel nacional (el caso del Estudio Nacional del Agua de Colombia 2014; IDEAM 2014). Estos estudios han mostrado que la evaluación de la huella hídrica aplicada a la cuenca, ofrece una comprensión completa e integrada de la apropiación humana del recurso hídrico, desde el punto de vista de consumo y contaminación del agua en relación con la disponibilidad de agua para consumo humano, es decir, los usuarios o beneficiarios de esa cuenca, en un periodo de tiempo determinado. Puesto que la evaluación comprende un análisis de sostenibilidad en el que incluyen sus tres pilares (ambiental, económico y social), es posible diseñar estrategias de respuesta realistas y que tienen en cuenta las necesidades de las personas y del medio ambiente, de manera participativa y con perspectiva de corto, mediano y largo plazo.

1. Water Footprint Network. Disponible en www.waterfootprint.org.



El propósito de esta guía metodológica consiste en difundir los aprendizajes adquiridos hasta el momento en lo relativo a la evaluación de la huella hídrica en cuenca, incluyendo conceptos básicos, pasos para su aplicación, los retos más frecuentemente encontrados, soluciones prácticas, al igual que su potencial y limitaciones. Esto con el fin último de acercar la herramienta de evaluación de la huella hídrica y su potencial a todos los actores y partes interesados en las cuencas latinoamericanas, y proveer una herramienta de gran utilidad en el trabajo hacia la sostenibilidad en el uso del agua en la región.

Este aspecto es crucial en estos tiempos cuando la expansión económica en Latinoamérica ocurre rápidamente, al ser de manera general una región relativamente bien dotada en recursos hídricos y con vastas extensiones de tierras con potencial agrícola. Latinoamérica es una potencia global en exportación de productos agrícolas, y sigue creciendo (Mekonnen *et al.* 2015, Willaarts *et al.* 2014). Además, se pueden identificar políticas de incentivos a algunos sectores productivos que han generado un aumento en la presión sobre el uso del suelo y los recursos hídricos. Dado lo anterior, es el momento de pensar en fortalecer la agricultura en la región, haciendo un uso sostenible del agua y asegurando la salud y sostenibilidad de los ecosistemas. La evaluación de la huella hídrica apoya este proceso, por lo que esperamos que esta guía metodológica sea un aporte para fortalecer y mejorar la gestión hídrica en la Región.

El **Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)**, en el marco del Proyecto *Agricultura sostenible, seguridad alimentaria y cambio climático en América Latina: Fortalecimiento de las capacidades de los actores claves para adaptar el sector agrícola al cambio climático y mitigar sus efectos EUROCLIMA-IICA*, con el financiamiento de la Unión Europea (UE), ha venido trabajando en el tema de la huella hídrica, como una propuesta que ofrece nueva información en torno a la adaptación al cambio climático del sector agrícola en Latinoamérica y el Caribe, fortaleciendo las capacidades técnicas e institucionalidad pública de los países en la Región, con el fin de que puedan desarrollar y evaluar nuevas estrategias que permitan complementar y enriquecer el trabajo que actualmente se realiza en los países para mejorar el uso eficiente del agua en la gestión territorial a nivel de cuenca.



2. Bases conceptuales

2.1 Introducción a la evaluación de la huella hídrica

La evaluación de la huella hídrica es una metodología desarrollada por el investigador holandés *Arjen Hoekstra* y su equipo de colaboradores de la Universidad de Twente. El *Manual de evaluación de huella hídrica* (Hoekstra et al. 2011) contiene una explicación detallada de los conceptos y aplicaciones de esta metodología, y fue desarrollado teniendo en cuenta las contribuciones de los miembros de la Red Internacional de Huella Hídrica.

La evaluación de la huella hídrica consta de cuatro fases (figura 2.1):

- i. Definición de objetivos y alcance de la evaluación**
A favor de la transparencia y claridad, deben entablarse las razones para desarrollar la evaluación, y definir sus límites. Esta discusión preliminar definirá, finalmente, las decisiones que deben tomarse durante el estudio, así como las suposiciones.
- ii. Contabilidad de la huella hídrica**
En esta fase se recolectan datos y se desarrolla la cuantificación. El nivel de detalle en esta fase depende de las decisiones realizadas en la fase anterior.
- iii. Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica**
Los resultados de huella hídrica son evaluados desde el punto de vista de la sostenibilidad ambiental, económica y social.
- iv. Formulación de estrategias de respuesta**
Con base en los resultados, se plantean estrategias o políticas de respuesta para mejorar la gestión del recurso hídrico.

Esta evaluación busca informar sobre el agua dulce consumida por los seres humanos, así como el grado de sostenibilidad de los territorios que proveen estos consumos, con el fin de apoyar la formulación de las estrategias eficientes y realistas para alcanzar un uso sostenible del agua en una cuenca. En los próximos capítulos se describirá cada una de las fases.



Fuente: Elaborado con base en Hoekstra et al. 2011.

Figura 2.1. Fases de la evaluación de la huella hídrica.



Esta metodología puede aplicarse para una gran variedad de casos diferentes, por ejemplo, para un proceso o grupo de procesos antrópicos (agricultura, manufactura, otros); para un producto (arroz, camisa, energía eléctrica); una empresa o sector empresarial, para un consumidor o grupo de consumidores (los habitantes de una nación); o a nivel geográfico (una cuenca, una localidad o una nación). Lo que todas estas aplicaciones tienen en común, es que cualquier huella hídrica está asociada a una localización geográfica y a un periodo de tiempo determinado, por lo que se dice que la huella hídrica es geográfica y temporalmente explícita.

El sentido que cualquier huella hídrica tiene, se logra entendiendo e integrando la huella hídrica y sus conceptos básicos como una parte del balance hídrico de una cuenca y comprendiendo, de esta forma, la situación hídrica de la unidad territorial en cuestión. Esto es válido para cualquiera de las aplicaciones, sea un proceso, un producto, un consumidor, y por supuesto, a nivel geográfico. Según la aplicación, los resultados de huella hídrica pueden emplearse para informar la estrategia hídrica de la empresa (en el caso de un producto) o sobre los patrones de consumo de una población (de un consumidor), o a los actores y autoridades de cuenca, sobre la gestión sostenible del recurso a nivel de su cuenca.

Los colores del agua y las huellas hídricas azul, verde y gris

La huella hídrica se basa en el desarrollo amplio de cuatro conceptos previos: agua verde, agua azul, agua gris y agua virtual, los cuales proveen la mayor parte de la base conceptual y metodológica que permite su aplicación y complementan la visión tradicional de la gestión del agua en el contexto de la aplicación de la Gestión Integral de Recursos Hídricos en una cuenca.

El **Agua Verde** hace referencia a la humedad del suelo y fue presentado por primera vez en 1993 por la profesora Malin Falkenmark (FAO 2000), con el propósito de dar señales y concientizar respecto al agua disponible para el crecimiento de la biomasa y su participación en la evapotranspiración. Más tarde, la FAO retomó el concepto primario y actualizó la definición del agua verde, considerándola como el flujo vertical de agua, es decir, agua almacenada en el suelo que soporta la vegetación en secano y que se mantiene en el suelo, pero que no hace parte del proceso de recarga a fuentes de agua superficial o subterránea. El concepto de agua verde permite considerar a los ecosistemas naturales como un usuario visible del agua, el cual está sometido a una competencia por el recurso hídrico, que es cuantificable por este medio.

El **Agua Azul** como concepto, se generó de manera natural como complemento a la definición del agua verde, de forma que el agua azul pasó a representar el flujo horizontal del agua, es decir, el agua de escorrentía, las fuentes de agua superficial, ríos y lagos, y fuentes de agua subterránea, acuíferos (FAO 2000). El agua azul se presenta como un concepto que agrupa en una sola idea a todo el recurso hídrico superficial y subterráneo, que representa la visión convencional de la Gestión Integral del Recurso Hídrico.



Figura 2.1.1. Ejemplo de suelo agrícola húmedo, denominado agua verde.





Figura 2.1.2. Ejemplo de agua azul, representada por un río.

de un producto o servicio, medida a lo largo de su cadena de suministro; de esta forma, si una nación exporta o importa un producto, se exporta o importa el agua virtual asociada a ese producto. El contenido de agua virtual de un producto es equivalente a la huella hídrica de ese producto en términos cuantitativos, no obstante, mientras que el agua virtual se refiere únicamente al volumen de agua contenido virtualmente en el producto, la huella hídrica ofrece la posibilidad de un análisis multidimensional, que es espacial y temporalmente explícito, orientado a entender la interacción entre las actividades antrópicas y la relación del agua con la cuenca.

El *Agua Gris* representa los vertimientos generados a causa de procesos antrópicos que llegan a fuentes de agua naturales y se identifican como una amenaza que puede alterar la condición de calidad natural del cuerpo receptor y por tanto, reducir la disponibilidad de agua para los usuarios.

El *Agua Virtual* fue introducida como concepto por el profesor John Anthony Allan a principios de los noventa (Allan 1993), y hace referencia al volumen de agua requerida o contaminada para la producción



Figura 2.1.3. Ejemplo de agua gris, representada por las aguas residuales de una industria.



Figura 2.1.4. Ejemplo del agua virtual contenida en la carne de cerdo, 1440 litros en 300 gramos.

Fuente: Tomado de <http://waterfootprint.org/en/resources/multi-media/#CP3>.

Como consecuencia de los conceptos anteriores, la *huella hídrica* representa la *apropiación humana de agua*, que se evidencia en el impacto en términos de consumo y contaminación del agua por parte de los seres humanos; en otras palabras, se refiere al consumo y contaminación del agua con fines productivos. Por uso consuntivo se entiende aquel uso en el cual el agua ya no se encuentra disponible para otros usos, sea porque: (1) se ha evaporado, (2) se ha transferido a otra cuenca, (3) se ha incorporado a un producto o (4) se ha contaminado. Por el contrario, el uso no consuntivo es aquel uso que permite un nuevo aprove-



chamamiento del agua, por ejemplo, [la navegación](#).

El impacto sobre el agua se identifica por colores, relativos al agua a la cual hace referencia, de esta forma, la evaluación de la huella hídrica abarca:

La **huella hídrica azul**, que se refiere al consumo de aguas superficiales (como por ejemplo ríos, lagos) y aguas subterráneas (**Agua Azul**). Su contabilidad tiene en cuenta agua azul evaporada, transferida a otra cuenca, o incorporada a un producto.

La **huella hídrica verde**, que se refiere al consumo de agua almacenada en el suelo como humedad proveniente de la precipitación (**Agua Verde**), que se evapora, usualmente en la agricultura.

La **huella hídrica gris**, que se refiere al agua requerida para asimilar una cierta carga de contaminantes (**Agua Gris**), basándose en la concentración ambiental natural y la norma de calidad ambiental del agua por compuesto químico. En otras palabras, esta se refiere a un “volumen” hipotético para reducir la concentración de la carga de contaminantes hasta que el agua alcance una calidad consistente con la norma de calidad ambiental, entendiendo que esta regulación garantiza que la disponibilidad por calidad del agua no se vea afectada.

La huella hídrica, por su división en los tres colores, complementa de manera significativa la visión tradicional de la contabilidad del uso del recurso hídrico. Al tener una visión complementaria a la tradicional (figura 2.2), se cuenta con nueva información para formular estrategias de gestión del recurso hídrico más eficientes:

- La extracción de agua azul, considerada tradicionalmente como la contabilidad principal del uso del agua, se separa en dos: uso consuntivo y uso no consuntivo. La parte del agua azul extraída que no se consume, es decir, que corresponde al uso no consuntivo, retorna a la cuenca de donde se extrajo, y por tanto, está disponible para otros usos. La huella hídrica se enfoca en el aspecto de uso consuntivo, es decir, el agua que, a partir del uso, ya no está disponible para otros usos. Además, la huella hídrica separa el uso consuntivo de aguas superficiales, del de aguas subterráneas.
- La huella hídrica aporta la contabilidad del uso y consumo de agua verde, correspondiente al agua almacenada en el suelo como humedad, que tiene como origen la precipitación. Aquí se incluye un recurso que hasta el momento se había excluido completamente de las cuantificaciones sobre uso de los recursos hídricos, y que tiene gran importancia para la producción agrícola en muchas partes del mundo, pues la mayor parte de los requerimientos hídricos de los cultivos son cubiertos por el agua verde. Es crucial incluir este recurso en la contabilidad del uso del recurso hídrico, con el fin de poder gestionarlo mejor. La huella hídrica en su componente verde también permite evidenciar la competencia por agua verde y territorio que ocurre en algunos sitios, entre ecosistemas naturales estratégicos para la producción y regulación del agua (bosques de alta montaña, punas o páramos) y los usos productivos agrícolas y pecuarios.
- La huella hídrica gris expresa las cargas de contaminación en unidades de volúmenes de agua, al igual que las huellas hídricas azul y verde.



Al tener las tres huellas en las mismas unidades, es posible visualizar cuál de ellas representa el mayor reto y se pueden definir acciones dirigidas a los puntos más críticos. Esta es la razón por la cual se hace importante énfasis en la recomendación de no sumar las tres huellas, pretendiendo tener un solo valor de huella hídrica.

Se recomienda hacer el análisis independiente de cada una de las huellas, de forma que se pueda analizar la información asociada a cada color de agua, sus procesos y sus impactos, lo cual aporta el real valor añadido del análisis, en torno a la gestión del agua a nivel de territorio.



Fuente: Elaborado con base en Hoekstra et al. 2011.

Figura 2.2. Componentes básicos de la huella hídrica y su comparación con la visión tradicional de la gestión del agua.

Evaluación de la huella hídrica a nivel geográfico: la cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica se define como una unidad territorial en la cual el agua que cae por precipitación se junta de manera natural, por gravedad, y escurre hacia un punto común, que puede ser un río, un lago o el mar. También se define como una unidad fisiográfica conformada por la reunión de un sistema de ríos definidos por el relieve (Franquet 2005). En una cuenca hidrográfica y para un periodo de tiempo determinado (por ejemplo un mes o un año), ocurre una cantidad de precipitación determinada. Este volumen de agua, que depende del área de la cuenca, se escurre, se evapora, o se almacena en la cuenca en forma de humedad del suelo, o incrementando el nivel de lagos y acuíferos (figura 2.3).





Figura 2.3. Representación de una cuenca y su balance de agua.

Fuente: Elaborado con base en Hoekstra et al. 2011.

Los flujos de entradas (precipitación²) y salidas (escorrentía y evapotranspiración) de agua en una cuenca hidrográfica, para un periodo de tiempo determinado, conforman el balance hídrico de la cuenca, y se pueden representar mediante la fórmula³:

$$\Delta S = P - E_s - ET \quad \text{Ecuación 1.}$$

En donde:

ΔS : Cambio en la acumulación del agua total en la cuenca. Si es positivo, significa un incremento en las reservas de agua de la cuenca (por ejemplo, aumento en los niveles de lagos, embalses o acuíferos).

P: Precipitación

E_s : Escorrentía

ET: Evapotranspiración

Se conoce como evapotranspiración (ET) a la suma de dos procesos separados de pérdida de agua líquida:

- El primero se da a través de la superficie del suelo por evaporación, que es el fenómeno por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y escapa de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de diversas superficies: cuerpos de agua superficial (lagos, ríos), suelos y la vegetación.
- El segundo hace referencia a la transpiración de un cultivo, que es el fenómeno por el cual se da la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior transferencia hacia la atmósfera.

La evapotranspiración en la cuenca es un fenómeno natural, que ocurre según las condiciones climáticas y la vegetación natural existente. Los seres humanos hemos alterado los balances hídricos naturales en las cuencas, al emplear ciertos flujos para nuestros propósitos. Por

2. Se resalta que la precipitación no tiene aún color de agua definido, ya que dependiendo del sitio donde caiga, se dividirá porcentualmente en una parte de agua verde y una parte de agua azul.

3. Esta es una forma simplificada del balance hídrico en la cuenca. Para mayores detalles ver Ordoñez 2011.

ejemplo, empleamos parte de la escorrentía (agua azul) para riego de cultivos. Del riego, una parte es evapotranspirada por las plantas y el suelo, y otra parte retorna al sistema hídrico de la cuenca a través del drenaje. La parte que es evapotranspirada pasa a ser una apropiación humana de agua y por tanto, aporta a la huella hídrica azul del cultivo. Al sustituir tierras naturales por tierras agrícolas, estamos empleando el agua almacenada en el suelo como humedad y proveniente de la precipitación, con un fin productivo, por lo que esta evapotranspiración pasa a ser una apropiación humana de agua, por lo que aporta a la huella hídrica verde del cultivo. De igual manera, al emitir cargas de contaminantes elevadas, la calidad del agua de la cuenca se afecta negativamente y se reduce su disponibilidad, pues no está más disponible para otros usos, por lo que hablamos también de una apropiación humana de agua dulce, asociada a un proceso determinado, y por tanto, de la huella hídrica gris.

La evaluación de la huella hídrica aplicada a cuencas busca sumar las huellas hídricas de un mismo color, de todos los procesos productivos localizados en el interior de la cuenca, y entenderlas como parte del balance hídrico, con el fin de obtener una visión completa de la situación hídrica de la cuenca, y comprender la relación entre el agua disponible en esa cuenca, de cada tipo de agua, frente a los requerimientos existentes de este mismo tipo de agua y para un periodo de tiempo determinado.

Puesto que la evaluación de la huella hídrica comprende, además de la fase de contabilidad, las fases de análisis de sostenibilidad y de formulación de respuestas, la evaluación busca también apoyar el diseño de estrategias de respuesta para realizar una asignación del agua sostenible, es decir, inteligente y eficiente. En otras palabras, la evaluación de la huella hídrica es, en este caso, una herramienta que apoya la gestión integrada del recurso hídrico (recuadro 2.1).

Recuadro 2.1. La huella hídrica apoyando la gestión integrada y participativa del recurso hídrico.

La evaluación de la huella hídrica aplicada a cuencas requiere una comprensión de todos los procesos que toman lugar en la cuenca y la contabilidad de sus huellas hídricas. La huella hídrica de una cuenca se calcula como la sumatoria de las huellas hídricas de todos los procesos que ocurren en el interior de esta:

$$HH_{\text{area}} = \sum_q HH_{\text{proc}}[q] \quad \text{Ecuación 2.}$$

En donde HH_{area} se define como la huella hídrica del área geográficamente delimitada, en este caso la cuenca, y HH_{proc} como la huella hídrica del proceso “q” en cuestión, que puede ser cualquier proceso como un determinado cultivo o una actividad industrial (Hoekstra *et al.* 2011).

Como se verá en el próximo capítulo, el alcance y los objetivos de un estudio de la huella hídrica se pueden acotar teniendo en cuenta los recursos y la información disponible para este, que puede pensarse como un estudio de escritorio realizado por un individuo, o como un proceso participativo. En ambos casos, se necesita obtener información sobre los consumos y disponibilidad de agua en toda la cuenca. La diferencia es que, en el primero, se puede simplificar el estudio optando por datos tomados de bases de datos globales disponibles públicamente, cuando el objetivo sea realizar una evaluación preliminar de huella hídrica para guiar la selección de puntos críticos (por ejemplo, sub-cuencas) y apuntar hacia algunas estrategias potenciales de respuesta.

En el caso de un proceso participativo, la evaluación de la huella hídrica puede emplearse como una herramienta de construcción de diálogo y participación alrededor de la situación hídrica de la cuenca; más aún, la fase 4 de la evaluación (formulación de estrategias de respuesta), puede desarrollarse en un proceso participativo con todos los actores de cuenca. En este caso, se requiere mayor nivel de detalle en los datos empleados para los cálculos. Por ejemplo, el trabajo desarrollado para la cuenca del río Porce en Colombia (CTA *et al.* 2013).

La experiencia muestra que, a menudo, el primer caso sirve para estimular la curiosidad y convocar a los actores de cuenca. El segundo caso ofrece mayores posibilidades de llevar a la práctica las estrategias de respuesta propuestas para aumentar la sostenibilidad del uso del agua en la cuenca.



3. Fase uno: Definición de objetivos y alcance de la evaluación de la huella hídrica

3.1. Introducción: ¿Por qué es importante definir los objetivos y el alcance del estudio?

Dentro del marco de esta guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica, puede decirse que el objetivo general del estudio consiste en evaluar la sostenibilidad ambiental, económico y social para una cuenca, en un periodo de tiempo determinado, con el fin de proponer estrategias de respuesta que aseguren un uso sostenible del recurso hídrico, para futuros y más amplios periodos de tiempo.

La definición de objetivos más específicos y el alcance de la evaluación de la huella hídrica, es un paso fundamental para guiar el desarrollo de las siguientes fases de la evaluación: la contabilidad de la huella hídrica, el análisis de sostenibilidad de esta y la formulación de estrategias de respuesta. Los objetivos y alcance pueden variar según las características de la organización u organizaciones que desarrollan el estudio, la cantidad de datos disponibles, los recursos disponibles para el estudio, o el uso que se le quiera dar a los resultados.

La formulación de objetivos y el alcance del estudio de la huella hídrica en cuenca:

- Provee claridad a las partes interesadas sobre lo que se quiere hacer.
- Permite desarrollar un plan de trabajo para el cálculo según los recursos disponibles para el estudio, a la vez que establece un plazo para el desarrollo del trabajo.
- Influye en la cantidad y profundidad de los datos que deben ser recopilados, y en el nivel de detalle que el estudio tendrá. Este aspecto preliminarmente puede identificar la relación de beneficio/costo del estudio.
- Guía la toma de decisiones sobre en qué aspectos del estudio es crucial profundizar (se necesitan datos nuevos y más detallados) y en dónde se pueden hacer simplificaciones o buscar otras fuentes de datos menos directas (por ejemplo, datos globales).
- Permite identificar, de manera preliminar, en dónde será necesario realizar suposiciones que influirán en la precisión y exactitud de los productos, y ajusta las expectativas de resultados.
- Se requiere para la comunicación adecuada tanto del planteamiento y desarrollo del proceso como de la socialización de los resultados de huella hídrica.

3.2. Aspectos que deben considerarse en la definición de objetivos y alcance

Mientras que la formulación de objetivos se refiere a la identificación del propósito del estudio y a la definición de los aspectos que se desean investigar como parte de este, la formulación del alcance se refiere a la definición de límites claros sobre cuáles aspectos se incluirán en las fases de contabilidad, análisis de sostenibilidad y formulación de respuestas, y cuáles se excluirán, según el propósito del estudio.

Esta sección conduce al lector en la formulación de objetivos y alcance de su estudio particular, basándose en el *Manual de evaluación de huella hídrica* (Hoekstra et al. 2011) y en las experiencias prácticas de los autores de esta guía.



3.2.1 Definición de objetivos

En la tabla 3.1 se presenta una lista de posibles preguntas a tener en cuenta por parte de los involucrados en el estudio, para definir los objetivos del estudio de la huella hídrica.

Tabla 3.1. Preguntas de investigación al momento de definir los objetivos de la evaluación de la huella hídrica en una cuenca.

Pregunta de investigación al momento de plantearse los objetivos del estudio	Comentario
<p>¿Cuál es el propósito final del estudio?</p> <p>Por ejemplo: Generar conciencia; realizar un estudio piloto de huella hídrica con fines académicos; identificar puntos críticos (subcuencas críticas); suministrar información clara a una plataforma de multi-actores para elaborar un plan de acción concreto enfocado al uso sostenible del agua en la cuenca; formular nuevas políticas de manera participativa; avalar la necesidad de invertir en acciones predeterminadas.</p> <p>Responder a las siguientes preguntas: ¿Cómo ocurre la asignación de agua en la cuenca a los diferentes sectores productivos y a la población? ¿Qué tan sostenible es el uso del agua en la cuenca, su asignación?; y ¿cómo aumentar la eficiencia de este uso para aumentar su sostenibilidad? ¿Evaluar la escasez de agua o el índice de contaminación del agua por subcuenca? ¿Suministrar información cuantitativa para una caracterización de los riesgos hídricos a nivel de cuenca?</p>	<p>El estudio puede abarcar, de manera simultánea, varias de estas preguntas y objetivos.</p>
<p>¿Cuáles son los límites geográficos del estudio? ¿Una o varias microcuencas, cuencas, subzonas hidrográficas o zonas hidrográficas?</p> <p>¿Cuáles sectores económicos se incluirán? ¿Sólo agricultura? ¿Sector industrial, energético, minero, o doméstico?</p>	<p>Se debe contar con una delimitación clara de las cuencas hidrográficas de interés. Se recomienda utilizar Sistemas de Información Geográfica (SIG), que facilitan la conceptualización, visualización y procesamiento de las variables geográficas descriptoras del territorio.</p> <p>En muchos casos, solo se aborda la agricultura con detalle, por ser este el sector que consume más agua.</p>
<p>¿Cuáles fases de la evaluación de la huella hídrica se incluirán? ¿Sólo contabilidad? ¿Se realizará un análisis de sostenibilidad? ¿Se realizará una formulación de estrategias de respuesta?</p> <p>¿Se desea analizar solo el uso consuntivo del agua (huellas hídricas verde y azul) o también la contaminación (huella hídrica gris)?</p> <p>¿Se desea diferenciar entre huella hídrica azul de fuentes superficiales o subterráneas?</p>	<p>La práctica indica que realizar solo un estudio de contabilidad es poco útil, si no se sabe qué tan sostenibles son estos resultados y qué se puede hacer para mejorar la situación.</p> <p>Según el estado del arte actual, se cuenta con estudios en los cuales las huellas hídricas verde y azul apoyan la formulación de estrategias y políticas hídricas, mientras que la huella hídrica gris se ha implementado en menor grado debido a los retos de investigación con los que todavía cuenta.</p>



<p>¿Se desea incluir el análisis de importación/exportación de agua virtual para la región geográfica escogida?</p> <p>¿Cuál es el mejor periodo de datos para el análisis? Se quiere hacer un análisis de tendencias, un resultado promedio, comparar años climatológicamente húmedos, secos o promedio?</p>	<p>Si se trata de una cuenca que es primordialmente exportadora, por ejemplo de productos agrícolas, quizás es interesante analizar cuánta agua virtual se exporta y cuánta se deja para consumo interno.</p> <p>Lo más común es realizar un estudio basado en promedios mensuales multianuales, aunque depende del objetivo del estudio, y de la información disponible.</p> <p>Existen en la actualidad fuentes de información disponibles que permiten acceder a registros históricos o a promedios multianuales, que pueden proveer datos meteorológicos para cuencas no instrumentadas o sin acceso a información. Estos datos permiten abordar estudios de huella hídrica, con diferente nivel de incertidumbre, sin que sea un limitante crítico la no disponibilidad de datos locales.</p>
<p>¿Se desea incluir un análisis que compare las huellas hídricas por unidad de producto, por ejemplo para comparar desempeño entre sectores?</p>	<p>Esto puede ser útil para evaluar la eficiencia en la asignación del recurso, pero requiere: i. Información detallada por sector, ii. Diplomacia en el manejo de los resultados, porque no se busca el señalamiento a ningún sector, sino más bien generar transparencia sobre cómo mejorar la eficiencia.</p>

3.2.2. Definición del alcance

Los aspectos que se incluirán o excluirán en la definición del alcance del estudio deben revisarse para cada fase de la evaluación de la huella hídrica: contabilidad, análisis de sostenibilidad y formulación de respuesta. La decisión sobre inclusión o exclusión de aspectos dependerá al final de los objetivos planteados en el estudio. Por otro lado, los recursos disponibles para el proyecto afectan en algún grado la definición del alcance del proyecto, con el fin de producir resultados prácticos dentro de un periodo de tiempo razonable y a la vez cumplir con los objetivos de este.

La tabla 3.2 presenta las preguntas por plantearse en el proceso de definición del alcance de la evaluación de la huella hídrica.



Tabla 3.2. Preguntas de investigación al momento de decidir el alcance de la evaluación de la huella hídrica.

Fase de la evaluación	Pregunta de investigación al momento de definir el alcance del estudio	Comentario
Contabilidad	<p>¿Se considerarán las huellas hídricas azul, verde y gris?</p> <p>¿Qué resolución espacio-temporal se empleará?</p> <p>¿Qué periodo de datos?</p> <p>¿Se incluirá la contabilidad de agua virtual exportada?</p>	<p>A nivel de cuenca, debe analizarse si se van a realizar cálculos por subcuenca o microcuenca, según los objetivos del estudio. Para el análisis de cuenca, se espera una resolución temporal mensual. Siempre se debe ser explícito al momento de presentar los resultados, sobre el periodo de datos seleccionado.</p>
Análisis de sostenibilidad	<p>¿Se analizará la sostenibilidad de las huellas hídricas azul, verde y gris, agregadas para todos los sectores con actividades dentro de la cuenca?</p> <p>¿Se analizará la sostenibilidad ambiental, económica y social de estas huellas hídricas?</p>	<p>Lo mínimo que se requiere en un análisis de sostenibilidad de la huella hídrica es el análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica azul, con el fin de identificar las subcuencas que son “puntos críticos” debido a la escasez de agua azul. En el nivel de cuenca, es deseable y muy recomendable incluir el análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica verde, con el fin de identificar las subcuencas con potenciales tensiones generadas por competencia hídrica y territorial entre ecosistemas naturales productores de agua, y el sector agropecuario. Otros estudios incluyen el análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica gris, así como los análisis de sostenibilidad económica y social de las huellas hídricas.</p>
Formulación de respuestas	<p>¿Qué puede hacerse y por quién? Con el fin de reducir la huella hídrica dentro de la cuenca, o mejorar su asignación.</p> <p>¿Se hará un listado de estrategias potenciales de respuesta, o se busca concretar un plan de acción con conceptos de proyecto específicos para llevar las estrategias propuestas a la práctica?</p>	<p>La pregunta “por quién” es fundamental. En muchos casos prácticos, se trata de estrategias diseñadas y priorizadas a través de un proceso participativo en el que los actores de cuenca están incluidos. Sólo a través de un proceso colectivo las estrategias propuestas tienen mayor chance de pasar a la acción concreta.</p>

En los recuadros 3.1 y 3.2 se presenta un ejemplo de la definición de objetivos y alcance, para el estudio de caso de evaluación de la huella hídrica en la cuenca del río Porce, Colombia.



Recuadro 3.1. Definición de los objetivos y el alcance para la evaluación de la huella hídrica en la cuenca del río Porce, Colombia (CTA 2013).

La cuenca del río Porce tiene un área de 5 248 km² y se encuentra localizada en el departamento de Antioquia, sobre la cordillera Central colombiana. El nacimiento de su cauce principal está definido por el río Aburrá, que nace en el alto de San Miguel en el municipio de Caldas, atraviesa diez municipios y se une al río Grande en Puente Gabino, cambiando de nombre a río Porce, el cual, tras un recorrido total de 252 km vierte sus aguas al río Nechí en el municipio de Zaragoza. La topografía de la cuenca es irregular y pendiente, con altitudes que oscilan entre los 80 y 3 340 msnm (ver mapa en el recuadro 3.2).

Objetivo general del estudio

Evaluar la huella hídrica en la cuenca para los sectores agropecuario, industrial, doméstico, de generación de energía eléctrica y minero. Los objetivos específicos fueron:

- Cuantificar la huella hídrica azul, verde y gris para los sectores propuestos con una resolución temporal mensual.
- Realizar la evaluación de sostenibilidad ambiental, económica y social de las huellas hídricas.
- Formular propuestas y estrategias de orden multisectorial, incluyendo al sector público y privado.
- Identificar el potencial de los resultados, como herramientas de política pública para la gestión integral del recurso hídrico.

Alcance

- Se identificaron y mapearon 7 zonas hidrológicamente diferenciadas y 31 subcuencas asociadas a 31 quebradas.
- Se incluyeron las cuatro fases de la evaluación de la huella hídrica.
- Se empleó información secundaria generada por fuentes oficiales, la cual fue validada y completada con fuentes de información primaria.
- Se contemplaron fuentes de agua superficial y subterránea, así como trasvases entre cuencas.
- En su mayoría, se recopiló información entre el 2005 y el 2011. En algunos casos fue necesario tomar información de años diferentes. Se aplicó una resolución temporal mensual, y en algunos casos en que la información se encontraba disponible a nivel anual, fue necesario realizar suposiciones para convertirla a nivel mensual (*si se puede mencionar de donde se tomó la información, guiaría al usuario, i.e. servicio meteorológico, etc*).
- El análisis de sostenibilidad económica se basó en lo propuesto por Salmoral *et al.* 2011 (ver detalles en el capítulo 5: Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica). Este incluyó las productividades aparentes del agua azul y verde, así como la productividad aparente de la tierra.
- El análisis de sostenibilidad social se basó en información del cubrimiento de agua potable y saneamiento a la población.
- La fase de formulación de respuestas se desarrolló de manera concertada, como resultado de un proceso participativo con actores de cuenca.

Recuadro 3.2. Mapa de la cuenca y subcuencas del río Porce, Colombia.

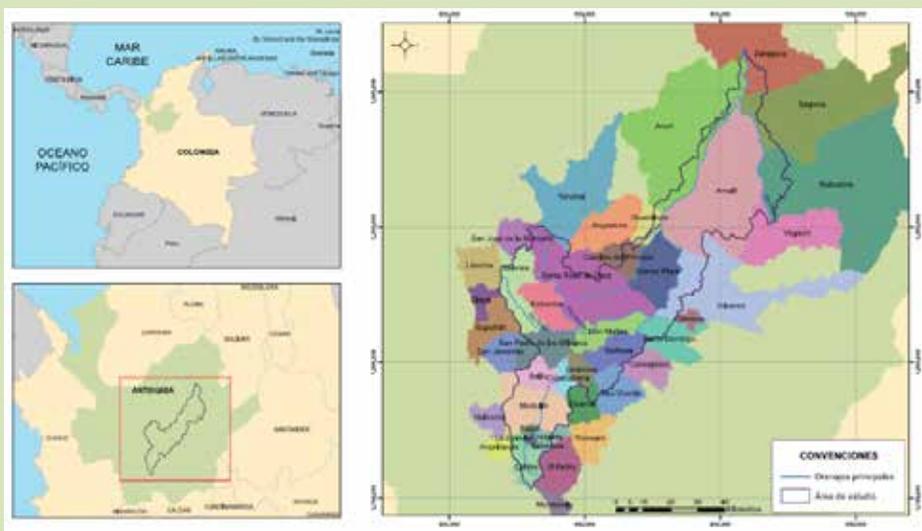


Figura 3.1. Localización geográfica de la cuenca del río Porce (Colombia). Fuente: CTA 2013.

3.3 Consejos prácticos sobre el proceso de definición de objetivos y alcance de una evaluación de huella hídrica

- En la realidad, el proceso de definición de objetivos y alcance de un estudio de huella hídrica ocurre al iniciar el proyecto, tras un mapeo preliminar de la cuenca, las subcuencas, ríos y quebradas, el uso del suelo, las actividades productivas, las zonas urbanas y otra información básica. Otro aspecto importante consiste en un listado preliminar de la información disponible.
- En muchas ocasiones, el alcance está dado por un conocimiento previo de la situación hídrica de la cuenca en cuestión. Por ejemplo, si se sabe que hay problemas importantes de deforestación o de usos productivos del suelo en zonas protegidas o de conservación, es de interés abordar el análisis de sostenibilidad de la huella hídrica verde en la cuenca, como se verá más adelante (capítulo 5).
- La experiencia muestra que debe volverse recurrentemente a estos objetivos y alcance, con el fin de apoyar la toma de decisiones durante las etapas de contabilidad y análisis de sostenibilidad. En muchos casos, los objetivos y el alcance guían sobre en dónde deben hacerse simplificaciones y suposiciones, y en dónde debe profundizarse en el estudio.
- En realidad se trata de un proceso iterativo, en el cual los objetivos y alcance formulados al principio requieren ajustes en etapas más avanzadas del proyecto. Por ejemplo, el líder del proyecto se da cuenta de que las expectativas son demasiado altas y debe acortar el alcance, por falta de información o de tiempo. O se da cuenta de que los resultados parciales muestran que hay una subcuenca, un sector o un grupo de productores prioritarios, y en los que vale la pena detallar los cálculos e invertir más recursos.

Si quieres aprender más sobre el vínculo entre cambio climático, agua y agricultura te invitamos al siguiente curso virtual:

Nombre: Fundamentos de la Huella Hídrica en el sector agrícola en un contexto de Cambio Climático
Costo: gratuito
Requisitos: ninguno
Duración: 20 horas aproximadamente
Matrícula en: <http://dle.iica.int/course/view.php?id=29>



4. Fase dos: Contabilidad de la huella hídrica

4.1 Introducción

Previo al comienzo de la fase de contabilidad de la huella hídrica a nivel de cuenca, se ha debido dejar bien claro cuáles deben ser los límites del estudio. Esos límites han debido establecerse en el alcance espacio-temporal, es decir, qué periodos de tiempo se desean analizar y contabilizar y por lo tanto, qué datos se van a necesitar. Igualmente, la definición de objetivos y alcance ha debido delimitar los sectores económicos que se desean incluir en el análisis y cuyos procesos toman lugar en la cuenca (agrícola, pecuario, doméstico, industrial, minero, etc.). Por otro lado, también ha debido quedar claro si se va a analizar solo el uso consuntivo del agua (contabilización de las huellas hídricas verde o azul), o si se va a incluir el análisis de la contaminación del agua (huella hídrica gris).

Esta guía metodológica se centra en la evaluación de las huellas hídricas a nivel de cuenca, entendiendo como tal la suma de las huellas hídricas de cada uno de los colores definidos anteriormente, y de todos los procesos existentes dentro de unos determinados límites geográficos, en este caso, los de una cuenca hidrográfica, tal y como se explicó en el capítulo 2. La huella hídrica forma parte del balance hídrico en la cuenca, y de los flujos que toman lugar en ella.

En la cuenca, el agua se mueve en ciclos, precipitando en forma de lluvia en la superficie terrestre de la cuenca, evaporándose desde las superficies de vuelta a la atmósfera, o a través del proceso de transpiración que ocurre en las superficies vegetales y que permite la producción de biomasa. La escorrentía arrastra el agua sobrante a las aguas superficiales como ríos y lagos, o a las aguas subterráneas, y finalmente fluye hasta ser entregada a otro cuerpo de agua de mayor importancia o al océano.

Por su parte, la huella hídrica estima el valor del agua apropiada por los seres humanos, para cualquier actividad productiva, que no retorna a la cuenca en un periodo de tiempo predefinido. En el caso de la agricultura, la huella hídrica verde permite conocer el volumen de agua evapotranspirada que proviene de la precipitación, almacenada en el suelo como humedad. Por otra parte, la huella hídrica azul determina el volumen de agua evapotranspirada proveniente de fuentes de agua superficial o subterránea, que ha sido empleada para riego con la ayuda de infraestructura especializada como canales de riego, tuberías, bombas. La figura 4.1 muestra esquemáticamente una cuenca en relación con las huellas hídricas azul y verde.



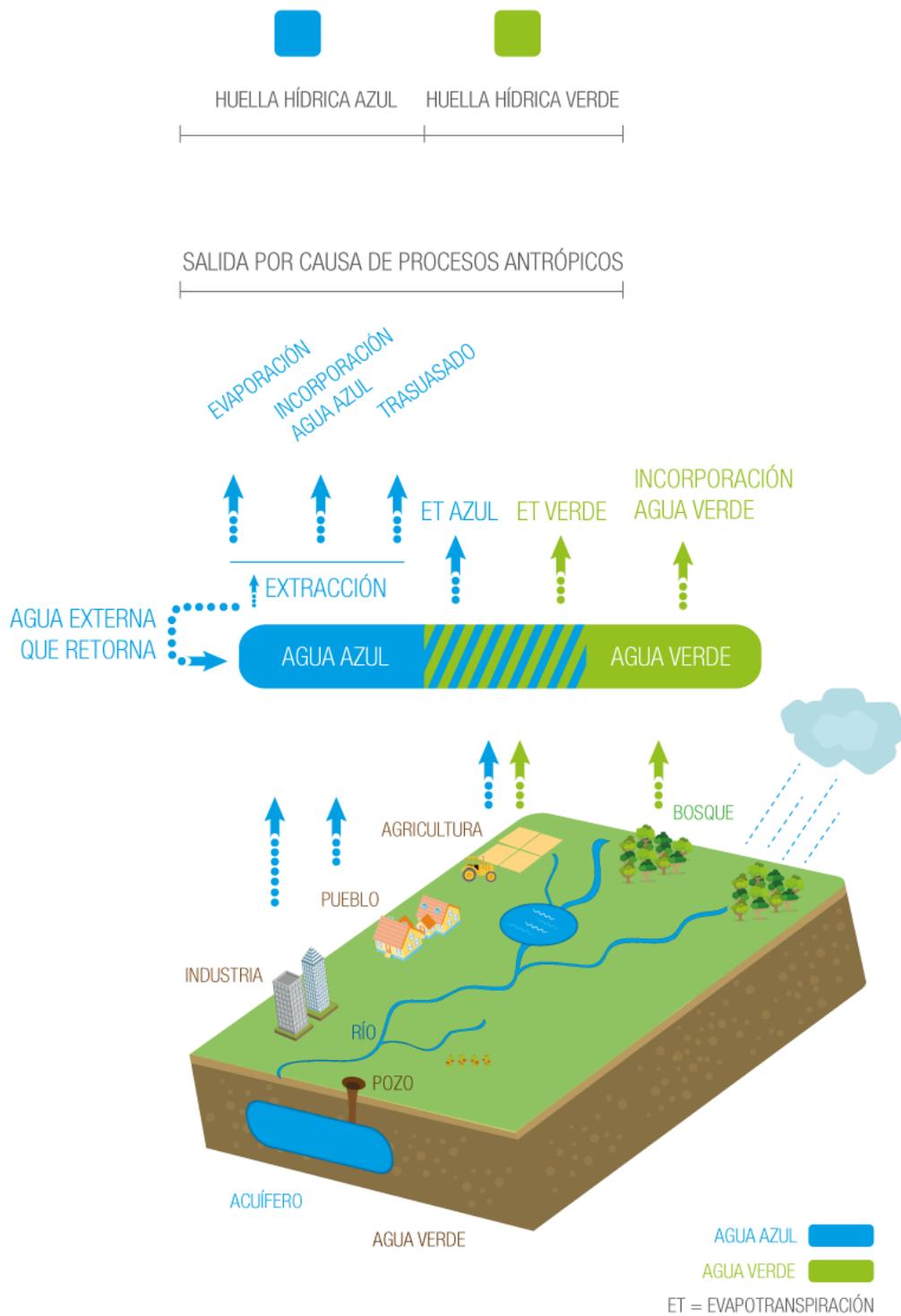


Figura 4.1. El ciclo del agua en una cuenca en relación con la huella hídrica.



NOTA:

En el caso del agua incorporada a los productos como parte de su biomasa, es inusual contabilizar esta como parte de la huella hídrica en los estudios prácticos, pues normalmente ella es del orden de 0.1 % del agua evapotranspirada, por lo que su adición a la huella hídrica final es mínima (Hoekstra et al. 2011). El agua azul incorporada a productos como por ejemplo las bebidas, puede por el contrario ser significativa. En el caso de algunos refrescos producidos por la industria alimenticia, el agua incorporada puede corresponder a más del 90 % del peso del producto final.

4.2. Contabilidad de la huella hídrica para el sector agrícola

4.2.1 Uso consuntivo del agua: las huellas hídricas azul y verde del sector agrícola

En el caso de la agricultura, el cálculo de la huella hídrica consiste, básicamente, en la estimación de la evapotranspiración verde y azul de los cultivos sembrados dentro de la cuenca, para el periodo de tiempo predeterminado en la definición del alcance del estudio. Como se verá detalladamente al final de esta sección, si se cuenta con la evapotranspiración de un cultivo, por ejemplo en unidades de mm/año, y se conoce el área de este cultivo dentro de la cuenca en hectáreas, se puede calcular el volumen de agua evapotranspirada por ese cultivo, en m³/año. Sucesivamente, este cálculo debe realizarse para todos los cultivos dentro de la cuenca. De manera general, se requiere la siguiente información:

- *Datos climáticos y de precipitación de la cuenca para el periodo de tiempo determinado:* Con el fin de calcular el componente verde y azul de la huella hídrica, se requiere conocer la distribución de la precipitación en la cuenca. A su vez, el cálculo de la evapotranspiración requiere otros datos climáticos como temperatura, radiación solar, velocidad del viento, entre otros.
- *Uso del suelo en la cuenca:* se requiere conocer la distribución de suelos agrícolas en la misma, qué cultivos, en dónde y su área.
- *Datos sobre el riego de los cultivos:* Qué cultivos se riegan, con qué frecuencia y qué cantidad de riego reciben. Según la definición de objetivos y alcance del estudio, puede ser necesario distinguir la fuente de riego (agua superficial, subterránea), y el tipo de riego (por gravedad, aspersión, goteo). Esta información sirve para el cálculo del componente azul de la huella hídrica.
- *Características del suelo de la cuenca:* para determinar el comportamiento del agua en el suelo, es necesario conocer las características texturales básicas del suelo, de forma que se extrapolen sus características hidráulicas.



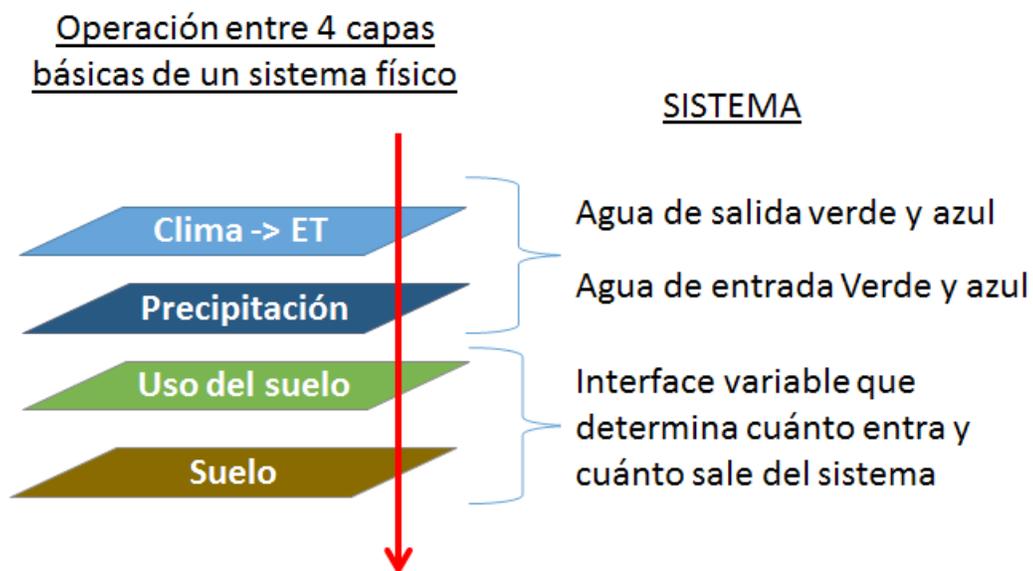


Figura 4.2. Esquema de cálculo para estimación de la huella hídrica verde y azul agrícola.

El cálculo de la huella hídrica en la cuenca presupone la estimación de la evapotranspiración (ET) de todos los cultivos distribuidos geográficamente en la cuenca, bajo diferentes condiciones climáticas y de precipitación, así como de diferentes condiciones de riego. El método más conocido para el cálculo de la evapotranspiración de un cultivo es el de Penman–Monteith, utilizado por la FAO (ver recuadro 4.1). Al momento de escribir esta guía metodológica, no se tiene conocimiento de un programa de computador, disponible al público, que realice el cálculo específico de huellas hídricas agrícolas geográficamente distribuidas. Sin embargo, existen programas de computador desarrollados por la FAO para el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos que se basan en el método de Penman–Monteith, cuyo propósito es estimar los requerimientos de agua de estos, con el fin de planear un riego eficiente y optimizar la producción agrícola. Estos programas están disponibles públicamente. Aunque el fin último de estos programas de computador es diferente (programar el riego y así asegurar la productividad más alta), se basan en el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos y por tanto, se pueden emplear para inferir las huellas hídricas verde y azul. Tal propósito requiere por parte del usuario una buena comprensión del significado de los colores de la huella hídrica, así como algunas manipulaciones adicionales a los archivos de salida de los programas, como exportación a Excel y transformación de unidades, teniendo en cuenta áreas y rendimientos agrícolas.

La tabla 4.1 presenta un listado de las herramientas más comunes para el cálculo de la huella hídrica y cómo estas se utilizan para tal cálculo, según el estado del arte actual.



Tabla 4.1. Herramientas existentes para el cálculo de la huella hídrica agrícola a nivel de cuenca.

Herramienta	Ventajas	Desventajas
CROPWAT (FAO)	<p>Programa disponible públicamente, relativamente sencillo de manejar, sólido científicamente, bien documentado.</p> <p>Incluye la posibilidad de realizar un balance diario de agua en el suelo y de incorporar datos de frecuencia y cantidad de riego.</p> <p>El tipo de riego se puede evaluar de manera indirecta, ajustando los valores de coeficiente del cultivo K_c.</p> <p>El programa cuenta con archivos básicos con características genéricas de suelos y cultivos, asimismo, recibe de manera directa los archivos de clima y precipitación, generados para cualquier punto geográfico por los programas Climwat o NewLocClim</p>	<p>Para el caso de una cuenca con numerosos cultivos, requiere un gran número de cálculos separados (para cada cultivo, cada condición climática y de riego), exportar archivo de salida a hojas de cálculo y realizar el cálculo de las huellas hídricas azul y verde “a mano”, empleando áreas de cultivos y rendimientos agrícolas.</p>
Incorporación de fórmulas para cálculo de ET_{total} , ET_{azul} y ET_{verde} a nivel de celda en un sistema de información geográfico (SIG)	<p>Permite un gran número de cálculos en poco tiempo, evaluación de escenarios, etc.</p>	<p>Requiere mayor inversión de tiempo, mejores conocimientos de programación y de SIG, o establecer alianzas para desarrollar este componente con entidades especializadas. No existe actualmente un programa como tal, disponible al público.</p>
Aquacrop-GIS (FAO)	<p>Programa disponible públicamente, permite un gran número de cálculos.</p>	<p>Se deben realizar los cálculos de las huellas hídricas azul y verde “a mano”, exportando resultados a hojas de cálculo y empleando áreas de cultivos y rendimientos agrícolas</p>

Nota: Ver el anexo 1 para más detalles sobre los programas CROPWAT y AQUACROP.

Cuando no se cuenta con la información de campo necesaria para calcular la huella hídrica con las herramientas propuestas en la tabla 4.1, es también posible emplear bases de datos globales de evapotranspiración real, como por ejemplo MODIS⁴. Esta evapotranspiración es calculada a partir de datos satelitales, y se puede descargar de manera gratuita para una malla geográfica con una resolución de 1 km x 1 km. Por este método de asignación de la evapotranspiración a la cuenca en cuestión, es posible obtener una aproximación a la huella hídrica, cuando se cuenta con mapas del uso del suelo que permiten asignar las evapotranspiraciones a cada uso. Este método puede ser útil cuando no se cuenta con otra información adicional, sin embargo, genera una importante incertidumbre la cual es aceptable en una primera aproximación, por lo que se recomienda sea analizada en detalle posteriormente en un análisis que permita tratar información local de detalle para cada estudio en específico. El Estudio Nacional del Agua de Colombia (IDEAM 2014) empleó este método para proporcionar un estimativo de la evapotranspiración en zonas de vegetación natural, a falta de información más detallada, y a manera de estudio piloto, para así poder evaluar la sostenibilidad de la huella hídrica verde (ver más detalles sobre este cálculo en el capítulo 5).

4. MOD16 project. Disponible en http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproducts.php?MOD_NUMBER=16

Recuadro 4.1. Cálculo de la evapotranspiración de un cultivo

El cálculo de la evapotranspiración de cultivos recomendado por FAO es el desarrollado por Penman-Monteith (Allen *et al.* 1998). La evapotranspiración del cultivo (*ETc*) se calcula como la evapotranspiración de referencia (*ET0*) multiplicada por el coeficiente del cultivo *Kc*:

$$ETc = Kc \times ET0 \quad \text{Ecuación 3.}$$

En donde:

ETc: Evapotranspiración potencial del cultivo

Kc: Coeficiente del cultivo. Allen *et al.* (1998) cuenta con una amplia base de datos sobre este parámetro.

ET0: Evapotranspiración de referencia

ET0, la evapotranspiración de referencia representa la evapotranspiración a partir de una superficie hipotética de referencia que corresponde a pasto creciendo, sin ningún tipo de limitación. *ET0* es una función de parámetros climáticos, únicamente.

Cuando se cuenta con datos más específicos sobre el tipo y características del suelo, es posible calcular la evapotranspiración real del cultivo bajo condiciones de estrés hídrica, realizando un balance diario de agua en el suelo. El balance de agua, que tiene en cuenta los flujos más importantes de agua en el suelo, permite estimar el coeficiente de estrés hídrico *Ks*, que tiene un efecto sobre la evapotranspiración real del cultivo, *ETa*. El principio detrás de este cálculo consiste en que la evapotranspiración real del cultivo se reduce bajo condiciones de estrés, por lo cual *Ks* es un factor menor que uno:

$$ETa = Ks \times ETc = Ks \times Kc \times ET0 \quad \text{Ecuación 4.}$$

En donde:

ETa: Evapotranspiración real del cultivo

Ks: Coeficiente de estrés hídrico

ETc: Evapotranspiración potencial del cultivo

Kc: Coeficiente del cultivo

ET0: Evapotranspiración de referencia

El valor de *ETa* [mm/día] permite la estimación directa del *Requerimiento Hídrico del Cultivo* [m³/ha]* (CWR, por sus siglas en inglés) como la sumatoria de la evapotranspiración acumulativa durante todo el periodo de crecimiento del cultivo.

Los programas de computador de la FAO se basan en estas ecuaciones para el cálculo de la evapotranspiración.

* La conversión de unidades entre [mm/día] y [m³/ha] se da con la multiplicación por un factor de 10.

Fuentes: FAO irrigation and Drainage Paper 56; Allen *et al.* 1998



4.4.2. Determinación de los componentes azul y verde de la huella hídrica de un cultivo

Una vez que se han obtenido los datos de evapotranspiración total del cultivo, se hace necesario determinar los componentes azul y verde de este parámetro. Para precisar estos componentes, se debe tener en cuenta el principio básico de que la entrada de agua al sistema es la precipitación, no obstante, no toda la precipitación que cae es utilizable por parte del cultivo, por lo que hay una proporción de precipitación efectiva que es la que realmente es capaz de suplir la necesidad hídrica del cultivo. Por otra parte, el riego es una manifestación de escasez de lluvia y se añade como suplemento, con el fin de satisfacer las necesidades de agua de un cultivo que presenta algún déficit hídrico, puesto que estas no pueden ser enteramente satisfechas por la precipitación. A su vez, no toda el agua que se usa para riego es evapotranspirada por el cultivo, una parte de esta regresa al sistema como parte del drenaje, lo cual da una diferencia entre el riego bruto y el riego neto aplicado. Adicionalmente, el volumen de riego aplicado es una decisión humana, por lo que puede existir una diferencia entre el requerimiento de riego de cultivo y el riego realmente aplicado. La formulación general para la estimación de los componentes verde y azul de la evapotranspiración es:

$$\text{Requerimiento de riego} = \text{Requerimiento hídrico de cultivo} - \text{Precipitación efectiva} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$ET_{\text{azul}} = \min(\text{Riego neto total}, \text{Requerimiento de riego}) \quad \text{Ecuación 6}$$

$$ET_{\text{verde}} = \min(\text{Requerimiento hídrico de cultivo}, \text{Precipitación efectiva}) \quad \text{Ecuación 7}$$

Puesto que la huella hídrica azul corresponde al agua de riego evapotranspirada para el crecimiento del cultivo, se recomienda hacer un balance de agua en el suelo a nivel diario, con el fin de estimar el requisito de agua del cultivo en relación con la precipitación existente y el riego añadido. Con base en estos parámetros, se pueden calcular los componentes azul y verde de la huella hídrica.

La tabla 4.2 muestra el cálculo de los componentes azul y verde de la huella hídrica para el cultivo de remolacha azucarera en la región de Valladolid, España. Este ejemplo fue tomado del *Manual de evaluación de huella hídrica* (Hoekstra *et al.* 2011). Para este cálculo se empleó el modelo CROPWAT 8.0 de la FAO, y se realizó un balance de agua en el suelo a nivel diario. Los datos y frecuencia de riego de la remolacha azucarera fueron incorporados al programa.

Tabla 4.2. Resultados de CROPWAT 8.0 para remolacha azucarera cultivada en la región de Valladolid, España: Datos de salida del programa en relación con el cálculo de los componentes azul y verde de la huella hídrica. Resultados en mm/año.

Riego total (bruto):	1 428.6	Precipitación total:	190.3
Riego (neto):	1 000.0	Precipitación efectiva ⁵ :	125.0
Por parte del cultivo:			
Uso real de agua (ET _a):	793.3	Requerimiento reales de riego:	668.3
Uso potencial de agua (ET _p):	793.3		

5. La precipitación efectiva es aquella porción de la precipitación que se almacena en el suelo en la zona de las raíces, y puede ser efectivamente utilizada por las plantas.

Este ejemplo muestra que el uso potencial de agua por parte del cultivo es 793.3 mm/año (ET_c), y la precipitación puede contribuir con 125.1 mm/año (precipitación efectiva). Por tanto, para que el cultivo crezca a plenitud, necesita que el riego contribuya con los 668.3 mm/año faltantes (requisito real de riego). El riego neto es de 1 000.0 mm/año, lo cual es mayor que el requisito real de riego, que es de 668.3 mm/año. Además, en este caso, a través del balance de agua en el suelo, el programa CROPWAT calcula que el cultivo en efecto recibe toda el agua que necesita, por lo que el uso potencial (ET_c) y el uso real de agua (ET_a) del cultivo es el mismo.

Por tanto, según el *Manual de evaluación de huella hídrica* (Hoekstra et al. 2011), el componente azul de la evapotranspiración corresponde al mínimo entre el riego neto total y el requisito real de riego:

$$ET_{\text{azul}} = \min (\text{Riego neto total}, \text{Requisito real de riego}) = \min (1\ 000.0, 668.3) = 668.3 \text{ mm/año}$$

El componente verde se calcula como la diferencia entre la evapotranspiración total y la evapotranspiración azul (aplicación de ecuación 7):

$$ET_{\text{verde}} = \min (\text{Requerimiento Hídrico de cultivo}, \text{Precipitación efectiva}) = \min (793.3, 125.0) = 125.0 \text{ mm/año}$$

Una forma alterna de llegar al mismo resultado se basa en la interpretación de los conceptos, entendiendo la evapotranspiración verde como la diferencia entre la evapotranspiración real del cultivo y la evapotranspiración azul.

$$ET_{\text{verde}} = ET_a - ET_{\text{azul}} = 793.3 - 668.3 = 125.0 \text{ mm/año}$$

A nivel de cuenca, se recomienda realizar el cálculo a nivel mensual. Por ejemplo, a partir del modelo CROPWAT; esto se puede llevar a cabo exportando el archivo resultado del balance de agua diario en el suelo a una hoja de cálculo, con el fin de estimar ET_{azul} y ET_{verde} en mm/mes, para cada cultivo.

Las huellas hídricas azul y verde, en m^3/mes , se calculan multiplicando ET_{azul} y ET_{verde} en unidades de mm/mes y transformadas a m/mes, por las superficies sembradas en m^2 . El recuadro 4.2 explica con más detalle las unidades de la huella hídrica.

Recuadro 4.2. Unidades de la huella hídrica

En el caso de la evaluación de la huella hídrica de una cuenca, se requiere obtener unidades volumétricas por unidad de tiempo, para cada sector o subsector, y para el caso del sector agrícola, aun por cultivo. Estas unidades son, por ejemplo, $\text{m}^3_{\text{(azul)}}$ /mes, $\text{m}^3_{\text{(verde)}}$ /mes, o $\text{m}^3_{\text{(gris)}}$ /mes. Estas unidades permitirán sucesivamente la comparación de la huella hídrica total de la cuenca con el agua disponible para uso humano, como se verá en el siguiente capítulo sobre análisis de sostenibilidad.

Según el alcance y objetivos del estudio, y el énfasis que se desea poner a los resultados, puede ser de gran utilidad evaluar las huellas hídricas agrícolas por unidad de producto. Para el caso agrícola, esto se realiza teniendo en cuenta los rendimientos agrícolas, con el fin de obtener la huella hídrica de los productos agrícolas de la cuenca en unidades de $\text{m}^3/\text{tonelada}$ de producto. Se recomienda reportar y analizar las huellas hídricas azul, verde y gris, por separado.

En el caso de otros sectores económicos, la huella hídrica por unidad de producto dependerá del tipo de producto o tipo de actividad. Por ejemplo, se puede hablar de m^3/Kwh en el caso del sector energético, de m^3/animal o m^3/kg de carne en el sector ganadero, de $\text{m}^3/\text{persona}$ en el sector doméstico, y así sucesivamente. Se recomienda reflexionar sobre el aspecto de las unidades dentro de la discusión del alcance y objetivos del estudio de la huella hídrica.

En cualquier caso, dentro de la cuenca, el hilo conductor de la contabilidad consiste en las unidades volumétricas por unidad de tiempo y por proceso, que toma lugar dentro de la cuenca.



4.2.3. Contaminación del agua: la huella hídrica gris del sector agrícola

La huella hídrica gris se define como el volumen teórico de agua dulce que se requeriría para la asimilación de un contaminante crítico determinado en un cuerpo de agua receptor de un vertimiento de agua gris. La huella hídrica gris se puede aplicar para el sector agrícola centrándose en fuentes de contaminación difusa (fertilizantes y agroquímicos) y fuentes de contaminación puntuales; para los otros sectores se centra en fuentes de contaminación puntuales (vertimientos puntuales de procesos productivos).

La fórmula para el cálculo de la huella hídrica gris descrita en el apartado 4.2.2, a partir de la carga de contaminantes (L), de la norma de calidad ambiental (C_{max}) y de la concentración natural del contaminante (C_{nat}), se aplica también para los otros sectores de la economía con actividades en la cuenca de interés. En este caso, especialmente en lo que respecta a las fuentes puntuales de contaminación, la carga de contaminantes se calcula según la siguiente fórmula:

$$HH_{proc,gris} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} = \frac{Efl \times c_{eff} - Extr \times c_{real}}{C_{max} - C_{nat}} \quad \text{Ecuación 9}$$

En donde:

- $HH_{proc,gris}$: Huella hídrica gris de un proceso específico ($m^3/año$ o m^3/mes)
- L : Carga de contaminante: se refiere a la carga del contaminante emitido por el proceso evaluado, que alcanza el cuerpo de agua (kg/mes , o $kg/año$).
- C_{max} : Norma de calidad ambiental para el contaminante de interés: se refiere a la concentración máxima permisible del contaminante en el agua (kg/m^3)
- C_{nat} : Concentración natural del contaminante en el agua (kg/m^3): se refiere a la concentración del contaminante que habría en el cuerpo de agua, sin ningún tipo de intervención humana.
- Efl : Volumen del efluente ($m^3/año$ o m^3/mes)
- C_{eff} : Concentración del contaminante de interés en el efluente (kg/m^3)
- $Extr$: Volumen de agua extraída ($m^3/año$ o m^3/mes)
- C_{real} : Concentración real del contaminante en el agua extraída (kg/m^3)

La carga L de contaminantes corresponde pues a la carga añadida por el proceso en cuestión, por tal razón, a la carga presente en el efluente del proceso ($Efl \times C_{eff}$) debe restársele la carga del mismo contaminante, que el agua ya trae antes del proceso ($Extr \times C_{real}$).

Es importante recordar que al reportarse, los resultados de la huella hídrica gris deben incluir el contaminante para el cual se hizo el cálculo y la norma de calidad ambiental empleada. De manera general, los contaminantes a estudiar han sido ya determinados durante la definición de objetivos y alcance del estudio. Si se trata de varios contaminantes, se recomienda reportar las huellas hídricas para todos los contaminantes analizados. En el caso de que se requiera resumir los resultados, se recomienda reportar la mayor huella hídrica gris calculada, porque se asume que al ser este un volumen de asimilación hipotético, todos los demás contaminantes ya se habrían asimilado en el mayor volumen obtenido hasta aún por debajo de sus normas de calidad ambiental, siendo este un criterio conservador.

A la hora de llevar a cabo una evaluación de la huella hídrica a nivel de cuenca, en la fase de contabilidad deben incluirse todos los procesos existentes en la cuenca, no solo la agricultura, aunque por lo general es el sector agrícola el que hace un mayor uso del agua en una cuenca. Sectores como el pecuario, hidroeléctrico, minero, industrial o doméstico, también deben incluirse.



4.2.4. Consideraciones para la contabilización de las huellas hídricas para los diferentes sectores económicos operando en la cuenca, aparte del agrícola

La tabla 4.4 presenta los aspectos por tener en cuenta a la hora de contabilizar la huella hídrica de los procesos (diferentes a procesos agrícolas) que toman lugar dentro de la cuenca. Los recuadros 4.3 y 4.4 presentan como ejemplo los resultados de contabilidad de huella hídrica obtenidos para la cuenca del río Porce en Colombia y su distribución geográfica.

Tabla 4.4. Aspectos más importantes por tener en cuenta para la contabilización de la huella hídrica de procesos diferentes a procesos agrícolas dentro de una cuenca.

Sector	Observaciones / Retos
Pecuario	Huellas hídricas verde y azul: Respondería a la suma de las huellas hídricas del alimento de los animales, siempre que estos sean cultivados dentro de la cuenca de interés (que al ser pastos o productos agrícolas se pueden calcular con el método CROPWAT), del agua consumida de manera directa por los animales y de la servidumbre. Huella hídrica gris: Se calcula como una fuente difusa de contaminación, según el uso que se da al estiércol del ganado. El objetivo consiste en tener una huella hídrica en m ³ /mes o m ³ /año para el sector, pero como se explicó en el recuadro 4.2, es posible calcular las huellas hídricas por unidad de producto o animal, según como se haya definido en los objetivos y alcance del estudio. Se debe tener en cuenta que se trata de un estudio de cuenca, y no se debe contabilizar la huella hídrica del alimento producido por fuera de la cuenca de interés.
Forestal	En muchos casos, la huella hídrica forestal no se puede asignar a un solo propósito (por ejemplo, producción de papel) pues pueden existir varios usos del área forestal. Se recomienda tener una discusión previa en la fase de definición de objetivos y alcance, sobre la asignación de la huella hídrica al sector.
Doméstico	El principal reto es la estimación de pérdidas por problemas en los organismos gestores de agua o la existencia de extracciones ilegales. En relación con la huella hídrica gris, influirá en gran medida el nivel de los sistemas de depuración.
Industrial	Un gran obstáculo suele ser el acceso a la información de uso del agua de la industria, por lo que hay que acudir a estadísticas nacionales o sectoriales, y a menudo realizar estimativos y suposiciones. Para la huella hídrica gris, será necesario conocer los caudales de entrada y salida del proceso, y su concentración de contaminantes, también a la entrada y a la salida. De manera general, la huella hídrica azul se calcula a menudo a través de un balance de agua del proceso, restando el caudal de salida al caudal de entrada. Se estima que la diferencia ha sido evaporada o incorporada durante el proceso.
Hidroeléctrico	La mayor parte de la huella hídrica del sector hidroeléctrico se encuentra en la evaporación de agua de los embalses. Algunos embalses son multipropósito (riego, consumo doméstico, producción eléctrica) por lo que el agua evaporada del embalse debe asignarse a cada sector.
Minero	Al igual que en el sector industrial, es habitual la opacidad de las actividades relacionadas con el uso del agua y frecuentemente, se deben realizar suposiciones. En relación con la huella hídrica gris, es importante conocer los principales contaminantes, que frecuentemente son metales pesados, con más requerimiento de agua para su asimilación.



Recuadro 4.3. Resultados de contabilización de la huella hídrica para la cuenca del río Porce, Colombia.

En el caso del río Porce, se realizó una contabilidad de las huellas hídricas verde, azul y gris para los sectores agropecuario, doméstico, industrial, hidroeléctrico y minero. Cada uno de los sectores presentó unos retos y características que debieron ser analizados de manera individualizada, y que fueron representados para cada subcuenca del área de estudio.

El sector agropecuario se dividió en 48 cultivos agrícolas de los cuales se consideraron 11 que representaban el 90 % de la producción total, y las actividades bovina, porcina, avícola y equina. Los resultados de la contabilización de la huella hídrica son los siguientes:

Sector	HH _{verde} Hm ³ /año	HH _{azul} Hm ³ /año	HH _{gris} Hm ³ /año	Contaminante más importante
Agrícola	231.0	13.5	4.8	N*
Pecuario	463.0	12.4	215.8	N*
Doméstico	-	27.8	11,788.2	DBO**
Industrial	-	8.0	4,078.5	DBO
Energético	-	24.4	-	-
Minería	-	3.7	3,059.1	SST***
Total	694	89.8		

*N: Nitrógeno

**DBO: Demanda Biológica de Oxígeno. Hace referencia a los contaminantes orgánicos

***SST: Sólidos Totales en Suspensión.

La huella hídrica total agrícola en la cuenca del río Porce se estimó en 250 Hm³/año (93 % verde, 5 % azul y 2 % gris). El café fue el cultivo que más contribuyó a la huella hídrica con 31 %, seguido por la caña de azúcar con 19 %, papas con 15 % y plátanos con 8 %. Para la estimación de la huella hídrica gris agrícola, se evaluó el nitrógeno proveniente de los fertilizantes. Para este contaminante, se determinó el cultivo del café como el de mayor contribución.

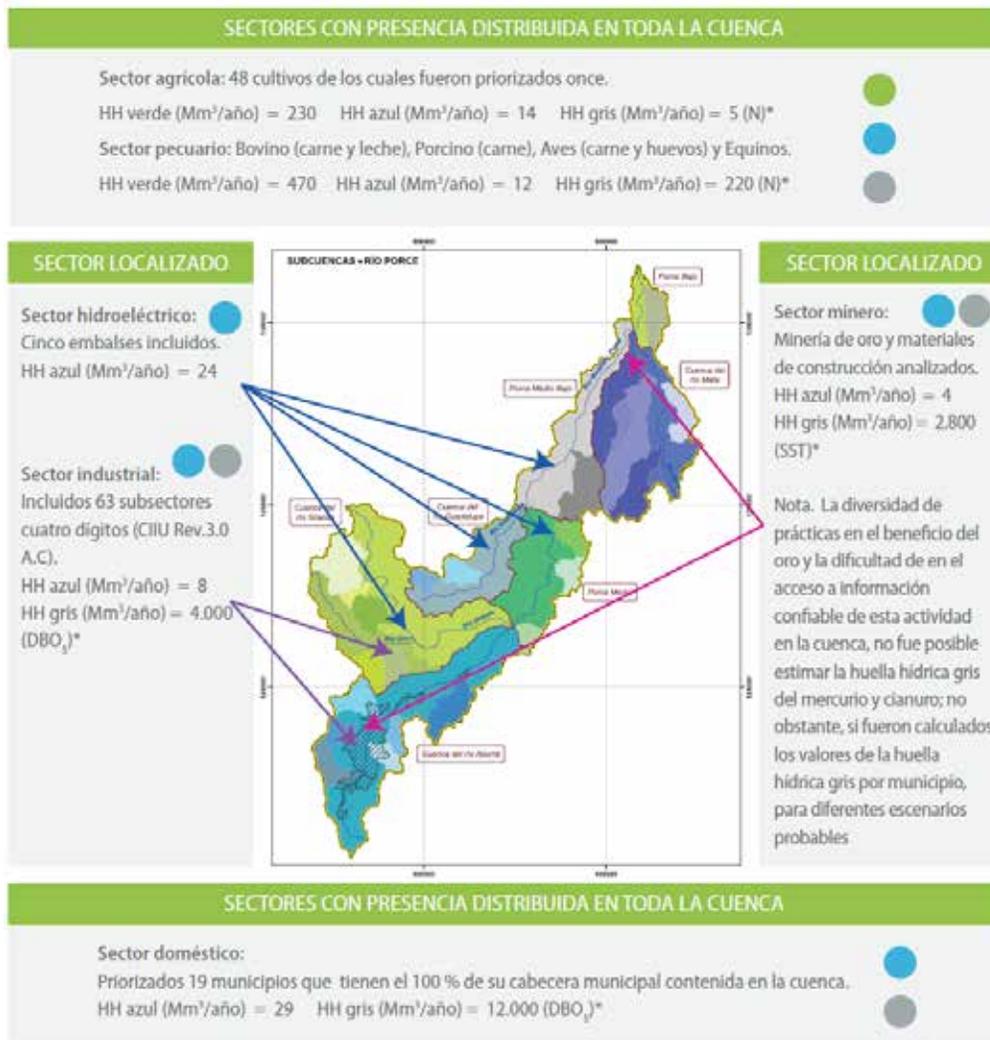
Algunas consideraciones:

- En relación con el sector industrial, la dificultad del acceso a datos y su consolidación hizo muy difícil unificar los resultados para el sector.
- Para el sector hidroeléctrico se contabilizó la huella hídrica azul referente a la evaporación de los embalses existentes en la cuenca.
- Finalmente, el sector minero presentó un gran reto al ser la minería de oro de veta la predominante, utilizando mercurio y cianuro en su proceso, y el acceso a los datos confiables fue un gran obstáculo. Sin embargo, los resultados se presentaron por municipio y para cuatro posibles escenarios de recuperación por mercurio. Los resultados en este sector reflejaron un alto valor de la huella hídrica gris, evidenciando el gran impacto que causan las actividades mineras en las fuentes de agua.

Fuente: CTA 2013.



Recuadro 4.4. Distribución geográfica de la huella hídrica en la cuenca del río Porce, Colombia.



Si quieres profundizar sobre la metodología de cálculo de la huella hídrica, practicar con ejercicios y ejemplos reales, te invitamos al siguiente curso virtual:

- Nombre:** Cálculo y evaluación de la Huella Hídrica como herramienta para la sostenibilidad territorial y la adaptación al cambio climático
- Costo:** gratuito
- Requisitos:** Se recomienda llevar el curso virtual de Fundamentos de la Huella Hídrica en el sector agrícola en un contexto de Cambio Climático
- Duración:** 20 horas aproximadamente
- Matrícula en:** <http://dle.iica.int/course/view.php?id=27>



4. Fase tres: Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica

5.1 Introducción: el alcance del análisis de sostenibilidad

De manera general, el análisis de sostenibilidad de la huella hídrica en una cuenca consiste en evaluar qué tan “sostenible” es la apropiación del recurso hídrico en esa cuenca, con el propósito último de informar sobre cuál es la mejor asignación posible del recurso en la cuenca, para las personas, los ecosistemas y las actividades económicas. La discusión sobre qué perspectivas se tendrá en cuenta para evaluar la sostenibilidad de la huella hídrica, debe ocurrir al principio del estudio. En general, se incluyen los tres pilares de la sostenibilidad como las tres perspectivas por analizar: ambiental, económica y social. Este capítulo presenta la metodología para realizar ese análisis de sostenibilidad, e incluye aspectos prácticos sobre su aplicación.

Como se explicó en el capítulo 2, el análisis de sostenibilidad requiere una reflexión previa sobre su alcance. Las siguientes preguntas guían esta reflexión:

- ¿Se analizará la sostenibilidad de las huellas hídricas azul, verde y gris de la cuenca?
- ¿Se analizarán las perspectivas de sostenibilidad ambiental, económica y social de estas huellas hídricas?
- ¿Qué criterios e indicadores se incluirán para desarrollar los análisis de sostenibilidad ambiental, económica y social?⁶
- ¿Qué resolución espacial y temporal se empleará?

5.2 Sostenibilidad ambiental

Los dos criterios fundamentales para analizar la sostenibilidad ambiental de la huella hídrica se refieren a:

- (1) *Cumplimiento de los requerimientos de agua del medio ambiente:* Según el *Manual de evaluación de huella hídrica* (Hoekstra *et al.* 2011), los flujos de aguas superficiales y subterráneas deberán permanecer dentro de ciertos rangos con respecto a la escorrentía natural. Estos rangos deben garantizar que haya agua suficiente para los ecosistemas y los medios de subsistencia humana de las personas viviendo en esa cuenca y que dependen de estos ecosistemas. Por ejemplo, en el caso de agua superficial, se trata de respetar el caudal mínimo ecológico del río o el nivel mínimo predeterminado por autoridades competentes de un lago.

En el caso de agua verde, se trata de respetar la necesidad de agua natural requerida por el ecosistema; cuando se hace referencia al agua verde se introduce de manera implícita el concepto amplio de competencia por recursos naturales agua y suelo, por tanto se está hablando de la necesidad de conservar ecosistemas proveedores de servicios ecosistémicos básicos que pueden estar en competencia sectorial a causa de la ampliación de la frontera agrícola, en muchos casos relacionada con el cambio climático.

- (2) *No excedencia de la capacidad de asimilación de contaminantes:* Este criterio se refiere a que la calidad del agua debe permanecer dentro de ciertos límites, que generalmente están dados por las normas de calidad ambiental.

6. En esta guía, los criterios de sostenibilidad se refieren a los aspectos ambientales, económicos y sociales que se desean incluir en el estudio. Los indicadores miden el desempeño de los criterios preestablecidos.



5.2.1. Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica azul

El análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica azul busca cuantificar la apropiación de agua azul total en la cuenca, es decir, la huella hídrica azul excede la disponibilidad de agua azul para uso humano. La metodología recomienda que este análisis debe desarrollarse a nivel mensual cuando se trata de una evaluación de cuenca, puesto que esta es la resolución temporal necesaria para comprender con suficiente detalle en dónde y cuándo se localizan los puntos críticos en la cuenca, y para realizar asignaciones eficaces sobre el uso del agua. Según la resolución espacial de la evaluación, el análisis de sostenibilidad permite identificar “puntos críticos” cuya huella hídrica azul presenta una situación de insostenibilidad ambiental.

La disponibilidad de agua azul en una cuenca o zona de captación (DA_{azul}) se define como:

$$DA_{\text{azul}} = \text{Oferta} - \text{Caudal}_{\text{ecológico}} \quad \text{Ecuación 10}$$

En donde la Oferta corresponde a la escorrentía natural, es decir, antes de la intervención humana. El caudal mínimo ecológico ($\text{Caudal}_{\text{ecológico}}$) se refiere a la cantidad necesaria de agua para que los ecosistemas y las necesidades básicas humanas se mantengan.

La escasez de agua azul (E_{azul}) se define como la relación entre la huella hídrica azul total de la cuenca o zona de captación, y la disponibilidad de agua azul (DA_{azul}):

$$E_{\text{azul}} = \frac{\sum HH_{\text{azul}}}{DA_{\text{azul}}} \quad \text{Ecuación 11}$$

El cálculo de E_{azul} permite identificar las cuencas con una situación de insostenibilidad ambiental y así realizar una priorización de estas. De la misma manera, cuando se calcula a nivel mensual, es posible identificar los meses del año en los cuales la situación requiere atención y por tanto, genera oportunidades de acción (figura 5.1).

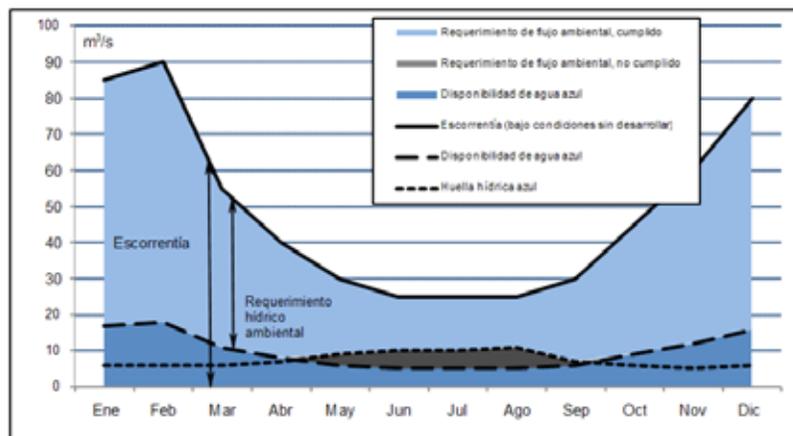


Figura 5.1. Huella hídrica azul versus caudal mínimo ecológico y oferta.

Fuente: Tomado de Hoekstra et al. 2011.



En el caso del Estudio Nacional del Agua de Colombia (IDEAM 2014), se evaluó la escasez de agua azul por subzona hidrográfica (cuenca nivel 3) para todo el país. Para el cálculo se empleó la oferta natural por subzona hidrográfica y un caudal ecológico, según los parámetros preestablecidos por el IDEAM, la autoridad ambiental nacional. La figura 5.2 muestra los resultados por subzona hidrográfica, indicando que la zona norte del país tiene los mayores valores de escasez de agua azul.

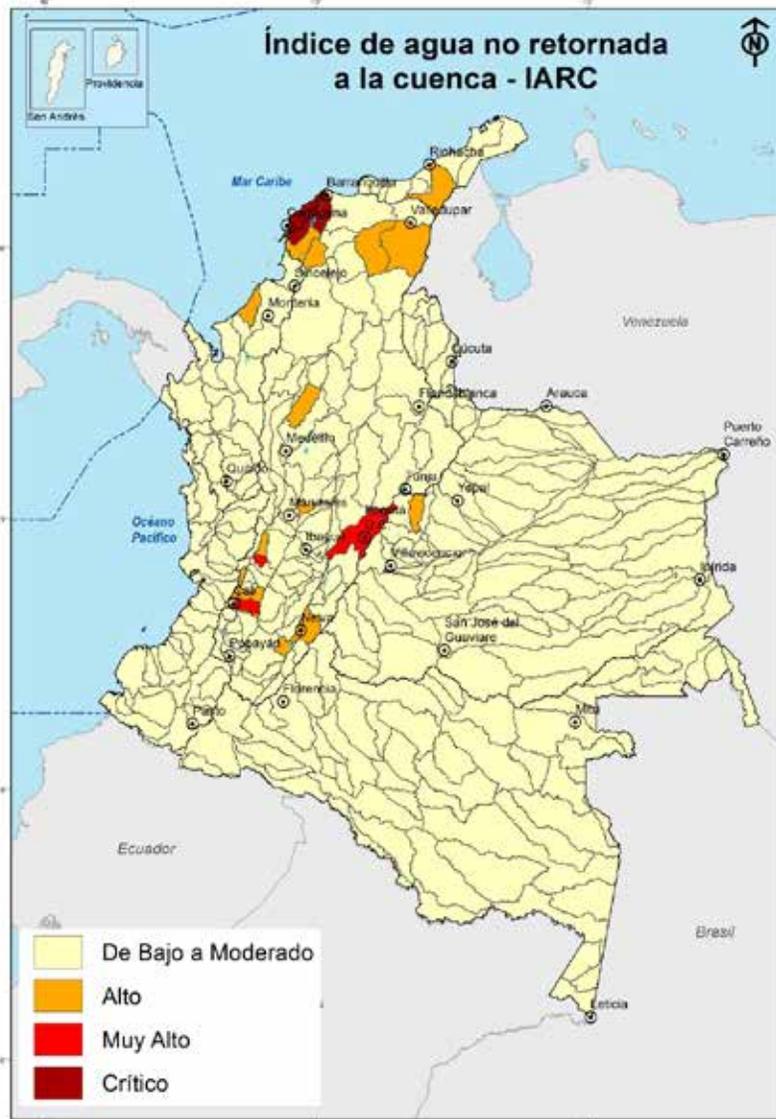


Figura 5.2. Escasez de agua azul⁷ por subzona hidrográfica en Colombia. Estudio Nacional del Agua de Colombia 2014.

Fuente: IDEAM 2015.

Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica verde

7. En el Estudio Nacional del Agua de Colombia 2014 (IDEAM 2015), la escasez de agua azul se denominó índice de agua no retornada a la cuenca (IARC), buscando armonizar el nombre del índice con la terminología empleada a nivel nacional (aunque la terminología de la Red Internacional de Huella Hídrica se refiere a "escasez de agua azul"). En un proceso de discusión con funcionarios del IDEAM, se definieron los siguientes límites: de bajo a moderado, menor a 0.2; alto, de 0.2 a 0.5; muy alto, de 0.5 a 1; crítico, mayor que 1.

El análisis de sostenibilidad de la huella hídrica verde busca cuantificar si la apropiación de agua verde total en la cuenca, es decir, la huella hídrica verde, excede la disponibilidad de agua verde para uso humano en ella. La disponibilidad de agua verde para uso humano se estima teniendo en cuenta los flujos evaporativos de agua almacenada en el suelo como humedad proveniente de la precipitación, es decir, teniendo en cuenta la evapotranspiración real que toma lugar en la cuenca. La evapotranspiración real depende de varios factores, entre otros el uso del suelo (la cobertura vegetal). Por tanto, la disponibilidad de agua verde está estrechamente relacionada con los usos del suelo designados para la cuenca.

La disponibilidad de agua verde en la cuenca durante un periodo de tiempo dado se define entonces como la evapotranspiración total (ET_{verde}) menos la evapotranspiración de la vegetación en ecosistemas designados como protegidos ($ET_{zonasprotegidas}$), menos la evapotranspiración en zonas no productivas (ET_{noprod}):

$$DA_{verde} = ET_{verde} - ET_{zonasprotegidas} - ET_{noprod} \quad \text{Ecuación 12}$$

La $ET_{zonasprotegidas}$ corresponde al flujo evaporativo mínimo ecológico designado por cuenca, que depende como ya se mencionó del uso del suelo existente, más exactamente de las zonas designadas como protegidas en la cuenca, por ejemplo parques naturales, páramos, ecosistemas que deben conservarse, etc., según la ley estatal, departamental o nacional.

La ET_{noprod} corresponde a una evapotranspiración que ocurre de todas formas, pero que no puede hacerse productiva, porque ocurre en zonas que han sido intervenidas para otros usos del suelo (ejemplo ciudades, zonas abandonadas, zonas que topográficamente no se pueden hacer productivas).

La escasez de agua verde (E_{verde}) se define como la relación entre la huella hídrica verde total de la cuenca y la disponibilidad de agua verde (DA_{verde}):

$$E_{verde} = \frac{\sum HH_{verde}}{DA_{verde}} \quad \text{Ecuación 13.}$$

Cabe recordar que la HH_{verde} corresponde al flujo evaporativo que ha sido apropiado en usos productivos, principalmente en la agricultura. Es decir, que aunque la nomenclatura no lo muestra, la HH_{verde} que aparece en el numerador de la fórmula de E_{verde} , forma parte intrínseca del denominador de esta misma fórmula, al formar parte de la evapotranspiración total de la cuenca (ET_{verde}). La escasez de agua verde (E_{verde}) será mayor que 1 cuando la HH_{verde} sea mayor que DA_{verde} . Esto ocurre cuando se está empleando el flujo evaporativo designado para el medio ambiente, es decir, de los ecosistemas protegidos, a usos productivos. Un ejemplo de este caso ocurre cuando se desarrollan actividades agrícolas o ganaderas en un parque natural protegido. Aquí se habla de una competencia entre el medio ambiente y los sectores productivos por el agua verde.

Para resumir, la escasez de agua verde está directamente relacionada con los usos del suelo. Si se desarrollan actividades productivas en zonas que deberían ser "protegidas", porque es de interés preservar esos ecosistemas así como los servicios que le prestan a los seres humanos, ocurre un solapamiento de los usos del suelo. En este caso y en términos hídricos, el agua que se emplea para producción, por ejemplo agrícola, está dejando de emplearse para el ecosistema. Ocurre por tanto competencia por el agua verde entre el ecosistema y la producción agrícola. Un ejemplo típico de este caso es la deforestación de la selva amazónica para producción de cultivos de soya. Tradicionalmente, el tema se aborda desde los usos del suelo y



las consecuencias de la deforestación, pero también se puede mirar el asunto desde el punto de vista de importantes recursos de agua verde, que en lugar de ser usados por el ecosistema amazónico, pasan a ser usados para la producción agrícola (Mekonnen *et al.* 2015).

En el caso del Estudio Nacional de Agua de Colombia 2014 (IDEAM 2015) se evaluó la escasez de agua verde por subzona hidrográfica. La figura 5.3 muestra los resultados.

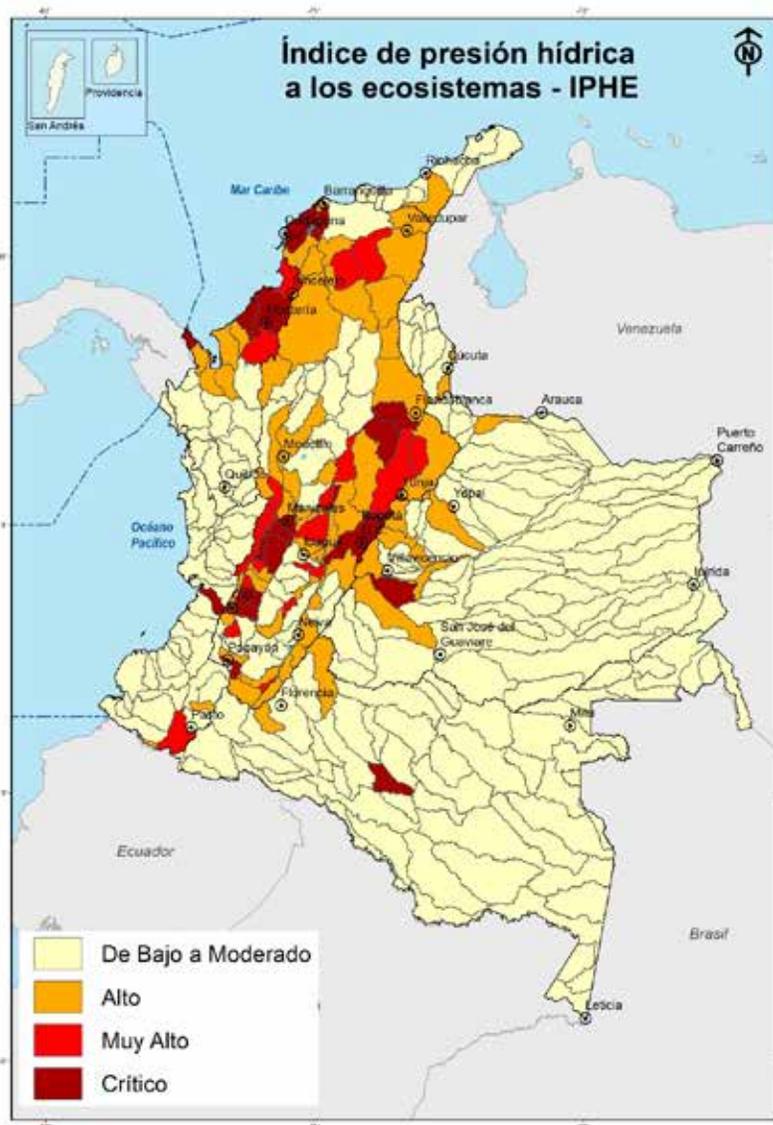


Figura 5.3. Escasez de agua verde⁸ por subzona hidrográfica en Colombia. Estudio Nacional del Agua de Colombia 2014.

Fuente: IDEAM 2015.

8. En el Estudio Nacional del Agua de Colombia 2014 (IDEAM 2015), la escasez de agua azul se denominó Índice de Presión Hídrica a los Ecosistemas (IPHE), buscando armonizar el nombre del índice con la terminología empleada a nivel nacional (aunque la terminología de la Red Internacional de Huella Hídrica se refiere a "escasez de agua verde"). En un proceso de discusión con funcionarios del IDEAM, se definieron los siguientes límites: De bajo a moderado, menor a 0.5; alto, de 0.5 a 0.8; muy alto, de 0.8 a 1; crítico, mayor que 1.

5.2.3. Sostenibilidad Ambiental de la huella hídrica gris

La capacidad de asimilación de una carga de contaminantes dada en una cuenca o zona de captación va a depender, en última instancia, de la cantidad de escurrimiento disponible para asimilar dicha carga. Cuando la norma de calidad ambiental del cuerpo de agua se viola, la capacidad de asimilación de este cuerpo ha sido agotada (Hoekstra *et al.* 2011). Esto se puede medir a través del índice de contaminación del agua (*NCA*) en la cuenca, que corresponde a la relación entre la huella hídrica gris total de esta (HH_{gris}) y la escurrimiento real (R_{real}):

$$NCA = \frac{\sum HH_{gris}}{R_{real}} \quad \text{Ecuación 14}$$

Un valor mayor que 1 de *NCA* indica que la situación es insostenible y que la capacidad asimilativa del río ha sido completamente consumida y aún sobrepasada. *NCA* puede calcularse a nivel mensual, con el fin de determinar los meses del año críticos. Además, al igual que la escasez de agua azul (E_{azul}), puede calcularse para toda la cuenca, subcuencas o microcuencas, según el alcance geográfico del estudio.

5.2.4. Consideraciones prácticas para el análisis de la sostenibilidad ambiental de la huella hídrica

General

- La escasez de agua azul, la escasez de agua verde y el nivel de contaminación del agua son indicadores que permiten evaluar los criterios relacionados con el aseguramiento de suficiente cantidad de agua para los ecosistemas y las personas, y una calidad del agua que permanece dentro de ciertos límites. La escasez de agua azul es el indicador más común a emplear en una evaluación de huella hídrica a nivel de cuenca, con el fin de priorizar las cuencas, subcuencas o microcuencas en donde debe tomarse acción. La escasez de agua verde se evaluó por primera vez en el Estudio Nacional del Agua en Colombia (IDEAM 2014) e implicó varios retos metodológicos, como se explica más adelante.
- El análisis de sostenibilidad de la huella hídrica implica una observación completa de la situación hídrica de la cuenca. Este solo se completa una vez que los resultados se analizan desde la perspectiva de las políticas existentes, la cultura, los patrones de uso del agua, y otros factores que influyen en el porqué de las huellas hídricas.

Huella hídrica azul

- Existen pocas cuencas con caudales mínimos ecológicos establecidos. En la práctica, se hace necesario en muchos casos tomar un porcentaje de la oferta natural de agua, a nivel mensual, como estimativo del caudal mínimo ecológico mensual. En este caso, la evaluación de huella hídrica apoya la discusión sobre la importancia de estimar de manera más precisa dichos caudales. Las leyes de agua de los países puede tomarse como referencia, ya que estas indican la cantidad de agua permitida para riego y la cantidad de agua que debe dejarse para mantener el caudal ecológico.

Huella hídrica verde

- La ecuación descrita de DA_{verde} supone que ya se ha realizado un trabajo previo de delimitación de zonas protegidas y que existe una legislación clara al respecto. Este no es el caso para muchas cuencas en Latinoamérica. Existen muchas cuencas de tamaño importante (por ejemplo, subzonas hidrográficas) en las cuales no se ha realizado ninguna delimitación de zonas o ecosistemas protegidos. Puede que tales cuencas tengan vastas extensiones de zonas naturales, pero estas no están protegidas según la



legislación. Las recomendaciones globales generales sobre zonas protegidas proponen diversos rangos de porcentajes de tierra que deberían dejarse para el ecosistema. El *Manual de evaluación de huella hídrica* (Hoekstra *et al.* 2011) propone trabajar con valores entre 12 % y 30 % por cuenca. Por último, la evaluación de huella hídrica conlleva a plantearse la pregunta sobre la necesidad de proteger áreas específicas de la cuenca y apoyar esta discusión.

- Para estimar la evapotranspiración total natural en una cuenca se requiere gran cantidad de datos y una distribución geográfica de estos, por ejemplo a través de una representación espacial (malla o grid), con el apoyo de un sistema de información geográfico. Si la cuenca cuenta con suficiente información meteorológica (precipitación y clima), es posible emplear diferentes métodos para estimar la evapotranspiración y realizar una interpolación para estimar una ET real por celda de la malla. En caso de no contarse con suficientes datos climáticos, es posible emplear datos de ET real provenientes de mediciones satelitales, disponibles a través de bases de datos globales como MODIS⁹. Estas bases de datos cuentan con una buena resolución espacial (1 km) y son de libre acceso. Si se cuenta con buenos mapas de uso del suelo para la cuenca, es posible realizar una intersección entre los mapas de evapotranspiración real y de uso del suelo con el fin de asignar la evapotranspiración a las diferentes zonas de interés, por ejemplo las zonas protegidas. Este método fue aplicado con éxito en Colombia para el Estudio Nacional del Agua (IDEAM 2014), tal y como se muestra en la figura 5.3.
- Otro aspecto interesante por considerar, tal y como se encontró en el caso de Colombia (IDEAM 2014), es que pueden existir subzonas hidrográficas o cuencas que tienen una escasez de agua verde menor que 1, pero que presentan competencia por el agua verde entre el medio ambiente y las actividades productivas, porque ocurren actividades agrícolas o ganaderas en zonas protegidas. Sin embargo, la escasez de agua verde sigue siendo menor que 1, pues hay importantes extensiones de tierra que contribuyen a la evapotranspiración verde total de la cuenca, que no están protegidas y que son potencialmente productivas. En este caso, el análisis de sostenibilidad de la huella hídrica verde indica que puede haber competencia por el recurso hídrico verde, aun cuando la escasez de agua verde no muestra un resultado de insostenibilidad.
- La experiencia muestra que aunque las recomendaciones generales para el análisis de sostenibilidad de huella hídrica verde en cuenca sugieren una resolución temporal mensual, al tratarse de usos inadecuados del suelo (por ejemplo agricultura en zonas protegidas), es suficiente con emplear una resolución temporal anual para extraer conclusiones.

Huella hídrica gris

- Muchas cuencas y regiones no cuentan con normas de calidad de agua preestablecidas para los cuerpos de agua, y cuando se logran encontrar, existen para un pequeño número de contaminantes. En muchos casos se hace necesario recurrir a las normas establecidas en otros países. Lo más importante en este caso es siempre reportar para qué contaminante se está calculando el nivel de contaminación del agua (NCA) y cuáles normas de calidad del agua se emplearon.

9. Proyecto MODIS. Disponible en http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproducts.php?MOD_NUMBER=16.



5.3 Análisis de la sostenibilidad económica de la huella hídrica

El *Manual de evaluación de huella hídrica* (Hoekstra *et al.* 2011) indica que cuando el agua no es usada de manera económicamente eficiente en una cuenca, la huella hídrica en esta es insostenible. Esta afirmación da una mirada global al recurso hídrico, considerando que se podría realizar una reasignación global del agua, con miras a producir productos más eficientes económicamente en cuencas con escasez de agua, y dejar los productos menos eficientes económicamente, pero necesarios para la subsistencia humana (como es el caso de los cereales), para cuencas con abundancia hídrica. En la práctica, la reasignación del agua en una cuenca ocurre teniendo en cuenta muchos factores que se discuten y negocian entre los diferentes actores de cuenca.

Más que analizar si la huella hídrica es sostenible o insostenible económicamente en una cuenca, la experiencia muestra que el análisis de sostenibilidad económica de la huella hídrica permite comparar la eficiencia económica del uso del agua entre las diferentes actividades productivas de la cuenca, y por tanto, complementa el análisis de sostenibilidad y apoya a la formulación de estrategias.

Existen dos indicadores que se aplican comúnmente para analizar la sostenibilidad económica de la huella hídrica (Salmoral *et al.* 2011, CTA 2013): la productividad aparente del agua y la productividad aparente de la tierra.

Productividad aparente del agua

Este indicador permite estimar los ingresos económicos por metro cúbico de agua consumida y es la división del precio de mercado brindado al productor (y no al consumidor, con el fin de eliminar el valor añadido debido a la comercialización y procesos industriales) entre la huella hídrica, ya sea azul o verde:

$$APW_{\text{azul}} (\$/m^3) = \frac{(\text{Precio de mercado } (\$/\text{unidad de producto}))}{(\text{Huella hídrica azul } (m^3/\text{unidad de producto}))}$$

$$APW_{\text{verde}} (\$/m^3) = \frac{(\text{Precio de mercado } (\$/\text{unidad de producto}))}{(\text{Huella hídrica verde } (m^3/\text{unidad de producto}))}$$

En donde:

APW azul: Productividad aparente del agua azul, \$/m³ de agua azul consumida

APW verde: Productividad aparente del agua verde, \$/m³ de agua verde consumida

Productividad aparente de la tierra (ALP) Ecuación 17.

Este indicador representa el valor económico a precios constantes por hectárea de tierra cultivada, por lo cual aplica solo para el sector agrícola. Se calcula multiplicando el precio de mercado del producto (\$/t) por su rendimiento (t/ha), para los cultivos, tanto en regadío como en secano.

$$ALP = \text{Precio de mercado } (\$/\text{tonelada}) \times \text{Rendimiento } (\text{tonelada}/\text{hectárea}) \quad \text{Ecuación 18.}$$

Aunque la productividad aparente de la tierra (APL, en \$/ha) no reporta directamente información sobre el uso de los recursos hídricos, complementa el análisis de sostenibilidad, puesto que los cambios producidos en él vienen motivados por las respuestas que adoptan los productores en relación con una serie de variables sobre las que pueden incidir y que afectan directamente a la producción y a sus resultados económicos (cambios de cultivos, mejoras tecnológicas, agua disponible para uso) y también a distintos condicionantes externos sobre los que no pueden actuar, pero que también modifican sus resultados económicos y producciones (subvenciones recibidas y las restricciones que estas acarrearán, evolución de los precios de los cultivos y las disponibilidades hídricas) (Gómez *et al.* 2009).



5.4 Análisis de la sostenibilidad social de la huella hídrica

El *Manual de evaluación de huella hídrica* (Hoekstra *et al.* 2011) explica que cuando el agua no es usada de manera equitativa en la cuenca, la huella hídrica en esta es insostenible. Este análisis busca informar sobre la equidad en el uso del agua basándose en los resultados de huella hídrica. En primer lugar, se deben precisar los “criterios” de sostenibilidad social que determinarán lo que se define como un uso de agua “equitativo”. Luego, se debe buscar cuantificar estos criterios a través de indicadores preestablecidos (que también tienen en cuenta la información disponible), y por último, los resultados se deben vincular con lo obtenido finalmente de las huellas hídricas.

La experiencia muestra que el análisis de sostenibilidad social proporciona otra perspectiva a los resultados de huella hídrica, desde el punto de vista de las necesidades sociales de los habitantes de la cuenca. Por ejemplo: ¿Hay cobertura de agua potable en la cuenca?, ¿Hay escasez de agua azul? Si hay suficiente agua azul, y baja cobertura de agua potable, se trata de un problema político, social o de infraestructura, pero en estos casos, la falta de cobertura no se debe a la escasez de agua.

Hasta la fecha, se han realizado muy pocos estudios de caso que incluyan el análisis de sostenibilidad social de la huella hídrica en cuenca. Se tiene conocimiento de dos casos:

Evaluación de huella hídrica de la cuenca del Porce, Colombia (CTA 2013): A través de los datos de cobertura de agua potable y saneamiento por subcuenca, este estudio definió las subcuencas “críticas” desde el punto de vista social. El criterio analizado consistió en que si la cuenca no posee escasez de agua azul, y la cobertura del servicio de agua potable es baja, se trata de un punto crítico socio-político. Por otro lado, si la cuenca posee una huella hídrica gris alta (índice alto de contaminación del agua) asociada a una baja cobertura del servicio de saneamiento, se trata de un punto crítico socio-ambiental (la raíz del problema yace en la falta de voluntad política y gestión pública).

Evaluación de huella hídrica para las cuencas latinoamericanas (Mekonnen *et al.* 2015): Este estudio evaluó la huella hídrica para las principales cuencas latinoamericanas, incluyendo la exportación e importación de agua virtual. El análisis de sostenibilidad social en este estudio incluyó la revisión de índices de malnutrición en Latinoamérica. Este estudio académico plantea la paradoja de cuencas, principalmente exportadoras de agua virtual en forma de productos agrícolas, localizadas en países o regiones con altos índices de malnutrición. Una vez más, se emplean los resultados para plantear la discusión sobre equidad en la distribución del recurso hídrico.



5. Fase cuatro: Formulación de estrategias de respuesta para la gestión de la huella hídrica

6.1 Introducción: ¿Qué son las estrategias de respuesta?

La fase de formulación de estrategias de respuesta comprende la definición de las acciones por tomar, con base en los resultados del estudio de huella hídrica realizado en las fases anteriores.

Las estrategias tradicionalmente están enfocadas a la reducción de huella hídrica, pero en muchos casos no se trata de su reducción en consumo volumétrico por unidad de tiempo, sino de aumento de la eficiencia en el uso del agua, aumento de la equidad en el uso de esta, productividad económica o protección de ecosistemas estratégicos.

Obviamente, en las prácticas agrícolas es muy difícil reducir las huellas hídricas verde y azul más allá de ciertos límites, pero en los sectores como el industrial y doméstico sí es posible tratar de acercarse a una huella hídrica cero, mediante el uso e implementación de distintas medidas. En el caso del sector agrícola eso es posible para la huella hídrica gris.

Como se ha mencionado previamente, la formulación de acciones de respuesta debe realizarse de manera integrada a nivel de cuenca, por lo tanto las acciones no deben ser establecidas de manera aislada, sino de manera conjunta e integradora entre los distintos actores implicados en la cuenca.

6.2 Estrategias de respuesta a nivel de cuenca

A la hora de desarrollar una estrategia de respuesta tras las conclusiones obtenidas a partir de la fase de contabilidad y análisis de sostenibilidad, es indispensable tener en cuenta que, a nivel de cuenca, existe habitualmente una gran diversidad de actores implicados. Por ello, es necesario integrar a los actores principales en el proceso de toma de decisiones y en la formulación de las soluciones.

Esa integración incluye tanto a los consumidores, como a los distintos sectores productivos y sus inversores como responsables del uso del agua en una cuenca, así como a los organismos públicos que gestionan la reglamentación y los incentivos en busca de un consumo sostenible, además de las organizaciones no gubernamentales (ONG), agencias de desarrollo o entidades académicas que buscan apoyar la protección del recurso en busca de un desarrollo sostenible.

Algunas de las estrategias de respuesta posibles por tomar desde una perspectiva de cuenca a nivel general, podrían ser:

- Ampliación de la red de monitoreo y control
- Mejora y ampliación de bases de datos relacionados con el uso del agua
- Mejora y desarrollo de la cartografía existente
- Ampliación de la cobertura de agua potable y alcantarillado
- Integración de políticas
- Delimitación de espacios protegidos
- Creación de plataformas de diálogo y cooperación entre usuarios del agua
- Desarrollo de planes de manejo de cuenca
- Desarrollo de planes de información y concienciación pública y educación ambiental



6.3 Estrategias de respuesta específicas por sector-actor:

La huella hídrica aporta nueva información en torno a la diferenciación del origen de los flujos de agua y sus impactos, separando por colores, esto permite definir de manera mucho más precisa, detallada y dirigida las estrategias de respuesta, aumentando la posibilidad de maximizar los resultados a nivel de cuenca. Con base en la experiencia y trabajos previos realizados, en la tabla 6.1 se plantean algunas estrategias de respuesta por sector de análisis. Además, el recuadro 6.1 presenta como ejemplo, la formulación de estrategias de respuesta desarrolladas durante la Evaluación de Huella Hídrica para el río Porce, Colombia (CTA 2013).

Tabla 6.1. Estrategias de respuesta potenciales por sector económico.

Sector	Estrategias de respuesta
<p>Agrícola y Pecuario</p> <p>Valor agregado de la huella hídrica: Incorporación del análisis de agua y huella hídrica verde, de manera complementaria y armónica al análisis tradicional de agua azul. Incorpora una visión del impacto de la contaminación complementaria a la tradicional, basada en una visión del ecosistema.</p>	Aumentar la productividad de la tierra en la agricultura de secano mediante la mejora de prácticas agrícolas, aumentando la productividad del agua (ton/m ³) y reduciendo así la huella hídrica verde.
	Mejora de técnicas de riego y de programación de este para minimizar la huella hídrica azul.
	Reducir (mediante la práctica de la agricultura ecológica) la aplicación de fertilizantes y pesticidas con el objeto de reducir la huella hídrica gris.
	Adoptar técnicas agrícolas que permitan mejorar los suelos y el compostaje para reducir la lixiviación y la escorrentía.
	Selección de cultivos apropiados a las condiciones locales.
	Aumentar la productividad de la tierra en la producción de pastos.
	Minimizar la ganadería en zonas o ecosistemas protegidos.
	Manejo responsable de excretas.
<p>Industrial</p> <p>Valor agregado de la huella hídrica: Incorporación de concepto de huella hídrica azul, como complemento a los conceptos de extracción, uso y como sinónimo de consumo hídrico, entendiendo la definición en relación con el fenómeno físico de extracción o uso y no retorno de volumen de agua. Incorpora una visión del impacto de la contaminación complementaria a la tradicional, basada en una visión del ecosistema.</p>	Definir las mejores prácticas y formular objetivos para cada sector industrial.
	Reducción del uso del agua operacional, aumentar reciclado, adoptar dispositivos de ahorro de agua con el objeto de reducir la huella hídrica azul.
	Establecer medidas especiales enfocadas a puntos críticos de consumo o contaminación de agua en el proceso.
	Reducción de aguas residuales, reciclaje de químicos, tratamiento de aguas residuales y recuperación de efluentes para reducir la huella hídrica gris.
	Medidas de compensación ambientales/sociales/económicas.
	Promover y adoptar metodologías y estándares globales para la contabilidad de la huella hídrica y el uso sostenible del agua.
	Divulgación de la huella hídrica, etiquetado de productos.



<p>Gobierno</p> <p>Valor agregado de la huella hídrica: La incorporación de los tres colores del agua y sus tres huellas permiten identificar puntos críticos a nivel territorial y generar políticas ambientales y productivas dirigidas a grupos de población o procesos específicos, que generan alto impacto.</p>	<p>Uso de la información sobre las huellas hídricas y comercio de agua virtual para apoyar la formulación de planes nacionales de agua y de cuenca.</p> <p>Aumentar e incentivar la eficiencia en el uso del agua en todos los sectores, mediante la promoción de técnicas que aumentan la productividad del agua y reduzcan de ese modo las huellas hídricas por unidad de producción.</p> <p>Aumentar la eficiencia del uso del agua a nivel de cuenca mediante la asignación de los recursos hídricos en busca de un mayor beneficio social.</p> <p>Redefinición de economías basadas en el suministro de agua no sostenible.</p> <p>No promover la agricultura que demanda uso intensivo de agua en zonas con escasez del recurso hídrico.</p> <p>Promover los cultivos que son adecuados y adaptados al clima local, con el fin de reducir la demanda de riego.</p> <p>Apoyar iniciativas e inversiones en sistemas de riego, técnicas de conservación de agua y mejoras de las redes de saneamiento y suministro de agua.</p>
<p>Sociedad Civil</p> <p>Valor agregado de la huella hídrica: La huella hídrica ha demostrado ampliamente su utilidad como instrumento de generación de conciencia frente a la corresponsabilidad asociada a usos directos e indirectos de agua y los cambios en los hábitos de vida y hábitos de producción y consumo, que pueden ser mejorados como parte de las respuestas de la sociedad civil.</p>	<p>Adopción de medidas de reducción de consumo doméstico, mediante cambio de hábitos e instalación de dispositivos orientados a la reducción del consumo.</p> <p>Cambios en los hábitos de consumo de bienes y servicios, basado en la información obtenida o generada de la huella hídrica de los productos provenientes de la cuenca de estudio.</p>



Reflexiones finales

Los nuevos paradigmas que plantea la evaluación de huella hídrica

Esta guía metodológica sobre la evaluación de huella hídrica enfocada a nivel de cuenca y para el sector agrícola, presentó con detalle las fases para llevar a cabo la evaluación: descripción de objetivos y alcance, cuantificación de huella hídrica, análisis de sostenibilidad de la huella hídrica y formulación de estrategias de respuesta. Ahora que el lector cuenta con suficientes bases teóricas y ha podido informarse sobre el estado del arte actual, se pueden resumir los nuevos paradigmas que yacen en la evaluación de huella hídrica:

Pensar en términos de unidades hidrológicas¹⁰: La evaluación de huella hídrica conlleva implícitamente a concebir cualquier actividad que emplee agua en términos de la(s) unidad(es) hidrológica(s) afectada(s). Automáticamente, esto implica que se debe tener un conocimiento de la geografía de la región y se deben expandir los límites del territorio que se considera afectado a la(s) unidad(es) hidrológica(s) en cuestión. Es decir, por ejemplo en el caso de un agricultor, mirar más allá de su terreno y considerar en su totalidad la fuente de agua que usa para el riego, teniendo en cuenta lo que sucede con la misma aguas arriba y aguas abajo.

Pensar en términos de unidades hidrológicas no es nuevo, si se considera la política y práctica existente sobre el manejo integrado de cuencas. Lo que es nuevo es la proposición para que cada productor agrícola, así como cada actividad o proceso que utilice agua, incorpore como paradigma base de su análisis a la unidad hidrológica. Esta noción es intrínseca a la huella hídrica.

Reconocer que el agua verde también cuenta y que es muy importante para la gestión del territorio: Una de las contribuciones más importantes de la huella hídrica consiste en la inclusión del concepto de agua verde dentro de la contabilidad del consumo de agua en la cuenca, y la posibilidad que genera el planear estrategias de respuesta que tienen en cuenta este valioso recurso.

Asegurar el buen estado de la unidad hidrológica: Esta nueva forma de pensar apunta automáticamente a reflexionar sobre cuáles son los requisitos de agua verde y azul de la cuenca (es decir, el flujo de evaporación necesario para conservar los ecosistemas protegidos en el caso del requisito de agua verde, y el caudal mínimo ecológico, en el caso del agua azul), para que sus ecosistemas se mantengan saludables, y sus habitantes cuenten con suficiente agua para sus necesidades domésticas y sus medios de subsistencia, con el fin de asegurar una cuenca sana y sostenible. Por tanto, las reflexiones y acciones dejan de ser individuales para pasar a ser colectivas. Se requiere entonces entablar diálogo con otros usuarios y participar en las discusiones de actores de cuenca, lo cual es otro paradigma intrínseco a la evaluación de huella hídrica en cuencas. En otras palabras, el buen estado de la cuenca no es solo función del gobierno o de otros actores, también forma parte de las responsabilidades como productor, y requiere acciones concretas por parte de los interesados en torno a los hábitos de producción y consumo.

Incluir los temas de eficiencia y equidad en las discusiones sobre el recurso hídrico: Otro de los nuevos paradigmas en la evaluación de huella hídrica se refiere a la necesidad de ampliar la discusión sobre el recurso hídrico a nivel de la unidad hidrológica, e incluir los

10. Una unidad hidrológica puede ser una cuenca, subcuenca, microcuenca, área de captación o zona de captación.



aspectos de eficiencia y equidad en el uso del recurso. Nos invita a plantearnos la pregunta: ¿qué tan equitativo es exportar agua virtual en forma de productos agrícolas, a partir de la cuenca, cuando sus habitantes sufren malnutrición?, o, ¿qué tan equitativo es tener una cuenca con importantes ingresos económicos gracias (en una parte) al uso de sus recursos hídricos disponibles, cuando sus habitantes no cuentan con servicios básicos de agua potable y saneamiento?, o, ¿cómo se puede aumentar la eficiencia en el uso del recurso, al mismo tiempo que se mantiene la productividad, con el fin de dejar más agua para los valiosos ecosistemas de la cuenca?

Debe quedar claro que el objetivo aquí no es “culpabilizar” a ningún usuario ni generar tensiones entre los actores de cuenca, sino más bien llevar a reflexiones colectivas e informar con datos científicamente sólidos la toma de decisiones, la cual debe llevarse a cabo por los actores de cuenca. Otro objetivo de esta discusión es desencadenar acuerdos público-privados que permitan generar recursos financieros para cubrir las necesidades de la cuenca como ecosistema y de sus habitantes. Para todo esto, es necesario participar e involucrarse.

Estado actual de la evaluación de la huella hídrica en cuencas

La evaluación de la huella hídrica ha sido aplicada para un número importante de cuencas alrededor del mundo, como se explicó en el capítulo 1. Esta se ha aplicado en diferentes niveles, desde estudios puramente académicos como por ejemplo el realizado por Mekonnen *et al.* (2015) para las mayores cuencas latinoamericanas, como estudios que buscan apoyar la toma de decisiones sobre el uso del recurso hídrico a nivel nacional, como es el caso del Estudio Nacional del Agua en Colombia realizado por la autoridad ambiental nacional IDEAM (2014), cuyos resultados sirven de insumo al Plan Nacional de Desarrollo. Las aplicaciones llevadas a cabo hasta el momento, han contribuido al cambio de paradigmas según lo descrito arriba. Más y más gente alrededor del mundo piensa en términos de unidades hidrológicas, comprende y reconoce los conceptos del agua verde y de las necesidades hídricas de los ecosistemas y las personas; e incluye reflexiones sobre eficiencia y equidad en el uso del agua a nivel de cuenca. No obstante, aún quedan muchos retos tales como:

Herramientas computacionales para el cálculo de la huella hídrica: Además de los programas desarrollados por la FAO para el cálculo de requisito y consumo de agua por parte de los cultivos, enfocados a evaluar y planear el riego, no existen programas específicos para calcular la huella hídrica en una cuenca, que estén disponibles al público. Cuando se requiere realizar un gran número de cálculos, el trabajo puede ser dispendioso con las herramientas actualmente disponibles.

La huella hídrica gris: La Red Internacional de Huella Hídrica publicó en el 2013 una guía de apoyo para la cuantificación de la huella hídrica gris (Franke *et al.* 2013), enfocándose en el nivel 1 de cálculo (ver el capítulo 4 para mayor información sobre los tres niveles de cálculo de la huella hídrica gris). Esta guía ha facilitado la implementación de la evaluación de la huella hídrica gris. Sin embargo, a criterio de los autores de esta guía, la aplicación práctica de la huella hídrica gris no se ha desarrollado tan ampliamente como aquella de las huellas hídricas azul y verde. Una razón yace en los retos que su cuantificación presupone, al considerarse algunas veces un nivel demasiado simplificado, al no contar con información disponible y confiable para niveles más profundos y detallados. Otra razón, y probablemente la más importante, yace en la dificultad para interpretar los resultados de manera que estos apoyen, de manera coordinada y armónica con los resultados de las huellas hídricas verde y azul, la definición de estrategias de respuesta concretas para disminuir la contaminación en la cuenca.



Es la experiencia de los autores de esta guía metodológica, que la huella hídrica gris aplicada según la guía propuesta para el nivel 1 (Franke, *et al.* 2013), puede aportar información valiosa para plantear estrategias de respuesta al problema de contaminación de una cuenca, aun y cuando se deban hacer suposiciones y se deban enfrentar retos importantes durante los cálculos.

Análisis de sostenibilidad económica y social: El mayor reto en este punto consiste en la falta de una guía práctica sobre cómo desarrollar este análisis, específico para los pilares económico y social de la sostenibilidad. Además de la guía metodológica para evaluación de huella hídrica en cuencas, generada como parte de los productos de su aplicación en la cuenca del río Porce en Colombia (CTA 2013), y de la presente guía, no se tiene conocimiento de otras guías prácticas que ilustren cómo debe llevarse a cabo este análisis. Según el conocimiento de los autores, este es el primer documento con alcance latinoamericano que incluye pautas prácticas sobre estos aspectos.

La huella hídrica como estrategia de adaptación al cambio climático

Una de las respuestas de adaptación más inmediatas y directas al cambio climático, por parte del sector agrícola, consiste en cuantificar su consumo de agua por actividad productiva. Esto no solo con referencia al agua de riego, sino también al agua verde. Este es el primer paso para determinar cómo se puede mejorar la eficiencia y cómo se desempeña el sector con respecto a los otros usuarios del agua en la cuenca y las necesidades de esta.

Conocer la proporción de las huellas hídricas azul/verde en la producción agrícola es crucial cuando se trata de evaluar cómo esta proporción puede cambiar en el futuro, según los escenarios de cambio climático y la disponibilidad de agua.

Pensar en términos de unidades hidrológicas y participar en las discusiones sobre la asignación del recurso hídrico y las políticas de agua, son también importantes estrategias para gestionar los riesgos hídricos y mantener o mejorar la productividad y la competitividad de cara al cambio climático.

Trabajo futuro

La producción agrícola en Latinoamérica con fines de exportación se encuentra en expansión. De igual manera, la producción de biocombustibles para completar las necesidades energéticas de los países en esta región, también sigue incrementando. Aunado a esto, Latinoamérica enfrenta retos importantes como el crecimiento de la población y por ende, la necesidad de aumentar la producción agrícola para satisfacer las necesidades de sus habitantes, sin necesariamente expandir la frontera agrícola, y la vulnerabilidad al cambio climático. Con todo lo anterior, se prevé un aumento en la competencia por el recurso hídrico, por lo que este será un limitante para el aumento de la producción. La planeación estratégica en el uso eficiente del recurso hídrico y la gestión integrada de este, son de suma importancia para enfrentar los desafíos impuestos. Para este fin, la evaluación de huella hídrica es una herramienta de gran apoyo.

Se hace necesario diseminar y poner en práctica la metodología de evaluación de huella hídrica en cuencas, como herramienta que apoye los procesos participativos sobre la gestión integral del recurso hídrico. Esto debe realizarse a nivel local y en un proceso colectivo con los actores de la cuenca. Esta guía busca apoyar este proceso.



Por último, cabe añadir que la huella hídrica se complementa con los indicadores ya existentes sobre la contabilidad del uso del recurso hídrico, y las estrategias de respuesta más eficientes se obtendrán a partir del análisis conjunto de huellas hídricas y otros indicadores hídricos, como por ejemplo la extracción de agua por sector económico.

Consideraciones finales

El desarrollo de esta guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica, permitirá a los beneficiarios del Proyecto EUROCLIMA-IICA llegar a una estimación y análisis cuantificado del recurso hídrico empleado en un producto o proceso específico dentro de una cuenca, además de guiarlos en la comprensión de los resultados que se obtengan y así poder tomar las mejores decisiones que permitan una gestión integral en su uso y manejo.

Este estudio se enmarca en el resultado 1 del Proyecto EUROCLIMA-IICA: *“Puntos focales de los Países Miembros del Programa EUROCLIMA, funcionarios y técnicos del sector agrícola y otros sectores afines, disponen de medidas de adaptación y mitigación sistematizadas y validadas, para diferentes escenarios de cambio climático y condiciones biofísicas y socioeconómicas”*, que contempló el desarrollo de estudios técnicos, en temas demandados por los Países Miembros. Además, el recurso hídrico ha sido identificado por los Puntos Focales del proyecto y Referentes Agrícolas Latinoamericanos como una prioridad, dada las proyecciones del cambio climático en la Región sobre este recurso y que incluye: cambios esperados con los aumentos en temperaturas, alteración del régimen de precipitación, el derretimiento de los glaciares y la salinización de suelos y acuíferos causado por el aumento en el nivel del mar.

La buena administración y gestión del recurso hídrico es uno de los factores esenciales para la sostenibilidad del sector agrícola. El suministro de agua, sea a través de las lluvias o bien por su obtención de fuentes superficiales y del subsuelo, se ha visto disminuido por el cambio climático, por lo que se requiere una mayor consciencia sobre el uso eficiente de este recurso vital. Conocer cuánto es el consumo de agua para la obtención de nuestros productos a través de estudios como este, nos permitirá determinar qué tan eficientes somos, el impacto que estamos generando al medio ambiente y, más importante aún, identificar oportunidades para mejorar.

Esta guía metodológica se ha desarrollado con el objetivo de permitir a los beneficiarios del proyecto, reflexionar sobre la necesidad y capacidades para desarrollar el método, así como seguir paso a paso el mecanismo, equipo y herramientas necesarios para la determinación y análisis de la huella hídrica del sector agropecuario a nivel de cuenca, permitiendo también obtener resultados en cadenas agrícolas priorizadas a escala territorial. Las ilustraciones y ejemplos presentes en el documento facilitan el desarrollo del proceso de evaluación y análisis, además, integra conceptos latinoamericanos que facilitan su implementación por los Países Miembros del Proyecto.

Adicionalmente, el desarrollo de este estudio pretende promover en la mayor cantidad de países latinoamericanos la aplicación de este procedimiento en sus cuencas, tal y como se ha realizado en el estudio técnico sobre evaluación de la huella hídrica en cuencas piloto de México, Guatemala, Costa Rica, Perú y Chile, desarrollado por el Proyecto EUROCLIMA-IICA, que se publicará en el 2017, y que permitirá tomar mayor conciencia de las acciones efectuadas en sus cuencas y al final del proceso, brindar propuestas en la gestión integral de los recursos hídricos, de forma eficiente y sostenible en nuestra Región.



Referencias

- Alcarno, J; Florke, M; Marker, M. 2007. Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Journal of Hydrological Sciences* 52(2):247-275.
- Aldaya, MM; Martínez-Santos, P; Llamas, MR. 2010. Incorporating the water footprint and virtual water into policy: Reflections from the Mancha Occidental Region, Spain. *Water Resources Management* 24(5):941-958.
- Aldaya, MM; Niemeyer, I; Zárata, E. 2011. Agua y globalización: retos y oportunidades para una mejor gestión de los recursos hídricos. *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros* 230:61-83.
- Allan, JA. 1993. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible. In ODA (Overseas Development Administration). *Proceeding of the Conference on: priorities for water resources allocation and management*. Londres, Reino Unido. p. 13-26.
- Allen, R; Pereira, L; Raes, D; Smith, M. 1998. *Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*. FAO Irrigation and Drainage Paper n.º 56.
- Chapagain, AK; Hoekstra, AY; Savenije, HHG; Gautam, R. 2006b. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological Economics* 60(1):186-203.
- CropLife Foundation. 2006. *National Pesticide Use Database 2002*, CropLife Foundation, Washington, DC. Disponible en www.croplifefoundation.org/cpri_npud2002.htm.
- CTA (Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia). 2013. *Evaluación de la huella hídrica en la cuenca del río Porce*. Medellín, Colombia.
- Dumont, A; Salmoral, G; Llamas, MR. 2013. The water footprint of a river basin with a special focus on groundwater: The case of Guadalquivir basin. Spain. *Water Resources and Industry*. 1-2: 60-76.
- EPA (Environmental Protection Agency, United States). 2005. *List of drinking water contaminants: Ground water and drinking water* (en línea). Washington, D.C., United States. Consultado 12 oct. 2016 Disponible en www.epa.gov/safewater/mcl.html#1.
- EU (European Union). 2000. *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy* (en línea). Consultado 1 nov. 2016. Disponible en <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/En/TXT/?uri=CELEX:32000L0060>. pdf.



- Eurostat. 2007. The Use of Plant Protection Products in the European Union: Data 1992-2003 (en línea). Luxemburg, Comisión Europea. (Eurostat Statistical Books). Consultado 15 nov. 2016. Disponible en <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/5611788/KS-76-06-669-EN.PDF/36c156f1-9fa9-4243-9bd3-f4c7c3c8286a?version=1.0.pdf>.
- Falkenmark, M. 1997. Meeting water requirements of an expanding world population. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. Londres, Reino Unido.
- Falkenmark, M. 2003. Fresh water as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges (en línea). Londres, Reino Unido, The Royal Society. Consultado 3 nov. 2016. Disponible en <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1693285/pdf/14728797.pdf>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). 2000. *New Dimensions in Water Security*. Roma, Italia. Report AGL/MISC/25/2000. Consultado 3 nov. 2016. Disponible en <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/misc25.pdf>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). 2005. *New LocClim, Local Climate Estimator CD-ROM* (en línea). Roma, Italia. Consultado 3 nov. 2016. Disponible en http://www.fao.org/NR/climpag/pub/en3_051002_en.asp
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). 2006. *Fertilizer use by crops* (en línea). Roma, Italia. Consultado 8 nov. 2016. Disponible en <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/fpnb17.pdf>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). 2010a. *CLIMWAT 2.0 database* (en línea). Roma, Italia. Consultado 8 nov. 2016. Disponible en http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_climwat.html
- FAO. 2010b. *CROPWAT 8.0 model* (en línea). Roma, Italia. Consultado 3 nov. 2016. Disponible en http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). 2010c. *FertiStat database* (en línea). Roma, Italia. Consultado 3 nov. 2016. Disponible en www.fao.org/ag/agl/fertistat.
- Franquet, JM. 2005. *Agua que no has de beber... 60 respuestas al Plan Hidrológico Nacional* (en línea). S.I. Littera Books. Consultado 15 nov. 2016. Disponible en <http://www.eumed.net/libros-gratis/2005/jmfb-h/index.htm>.
- Franke, NA; Boyacioglu, H; Hoekstra, AY. 2013. *Grey Water Footprint Assessment: Tier 1 – Supporting Guidelines*. Enschede, Países Bajos, Water Footprint Network.
- Gómez-Limón, JA; Calatrava, J; Garrido, A; Sáez, FJ; Xabadia, A (eds.). 2009. *La economía del agua de riego en España: una perspectiva regional*. Cajamar, España. ISBN: 978-84-95531-45-2.
- Heffer, P. 2009. *Assessment of fertilizer use by crop at the global level* (en línea). París, Francia, International Fertilizer Industry Association. Consultado 16 nov. 2016. Disponible en http://www.fertilizer.org/imis20/images/Library_Downloads/AgCom.13.39%20-%20FUBC%20assessment%202010.pdf.



- Hoekstra, AY (ed.). 2003. Virtual water trade: proceedings of the international expert meeting on virtual water trade, IHE Delft, the Netherlands, 12-13 December 2002. Value of Water Research Report Series n.º 12, IHE, Delft, the Netherlands.
- Hoekstra, AY; Chapagain, AK. 2008. Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources. Oxford, Reino Unido, Blackwell Publishing.
- Hoekstra, AY; Chapagain, AK; Aldaya, MM; Mekonnen, MM. 2009. Water Footprint Manual: State of the Art 2009 (en línea). Enschede, Países Bajos, Water Footprint Network. Consultado 17 nov. 2016. Disponible en <http://doc.utwente.nl/77211/1/Hoekstra09WaterFootprintManual.pdf>.
- Hoekstra, AY; Chapagain, AK; Aldaya, MM; Mekonnen, MM. 2011. The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Londres, Reino Unido, Earthscan.
- Hoekstra, AY; Hung, PQ. 2002. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Delft, Países Bajos, UNESCO-IHE Institute for Water Education. (Value of Water Research Report Series n.º 11).
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, CO). 2015. Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá, Colombia. 496 p.
- IFA (International Fertilizer Association, FR). 2009 'IFA data' (en línea). París, Francia. Consultado 3 nov. 2016. Disponible en www.fertilizer.org/ifa/ifadata/search.
- Leavell, D; Portocarrero, C. 2003. Sustainability of Peruvian water resources in light of climate change (en línea). Columbus, Estados Unidos de América, Ohio State University. Consultado 19 oct. 2016. Disponible en <http://newark.osu.edu/facultystaff/personal/dleavell/Documents/sustainability%20of%20peruvian%20water%20resources%20in%20light%20of%20climate%20change.pdf>.
- Liu, C; Kroeze, C; Hoekstra, AY; Gerbens-Leenes, W. 2012. Past and future trends in grey water footprints of anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to major world rivers. *Ecological Indicators* 18:42-49.
- MacDonald, D; Berger, T; Wood, K; Brown, J; Johnsen, M.I. ; Brydges, K; MacDonald, M.J. ; Smith S.L. ; Shaw D.P. 2000. Compendium of Environmental Quality Benchmarks (en línea). Nanaimo, Canadá, MacDonald Environmental Sciences. Consultado 16 nov. 2016. Disponible en www.rcaro.org/attach/filedownloads/do_down/no/10049.pdf.
- Mekonnen, MM; Hoekstra, AY. 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences* 15(5):1577-1600.
- Mekonnen, MM; Pahlow, M; Aldaya, MM; Zarate, E; Hoekstra, AY. 2015. Sustainability, efficiency and equitability of water consumption and pollution in Latin America and the Caribbean. *Sustainability* 7(2):2086-2112.
- NASS (National Agricultural Statistics Service, US). 2009. Agricultural Chemical Use Database (en línea). Estados Unidos, s.e. Consultado 19 oct. 2016. Disponible en https://www.nass.usda.gov/Surveys/Guide_to_NASS_Surveys/Chemical_Use/



- Ordoñez, J. 2011. Contribuyendo al desarrollo de una cultura del agua y la gestión integral del recurso hídrico. Cartilla técnica: Balance hídrico superficial (en línea). Lima, Perú, Sociedad Geográfica de Lima. Consultado 23 nov. 2016. Disponible en http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/Publicaciones/Varios/Balance_Hidrico.pdf.
- Pérez, R. 2013. Aplicaciones del enfoque de hh para el análisis de impactos en sectores y regiones. Capítulo 17: Huella hídrica de cuatro cereales en el Distrito de Riego 011 (en línea). Ciudad de México, MX, Universidad Autónoma Metropolitana. Consultado 16 nov. 2016. Disponible en http://148.206.107.15/biblioteca_digital/capitulos/425-5803wfp.pdf.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, KE). 2009. GEMSTAT: Global water quality data and statistics. Global Environment Monitoring System (en línea). Nairobi, KE. Consultado 17 nov. 2016. Disponible en www.gemstat.org.
- Salmoral, G; Dumont, A; Aldaya, MM; Rodríguez-Casado, R; Garrido, A; Llamas, MR. 2011. Análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir. Madrid, España, Fundación Botín
- Steduto, P; Hsiao, T.C; Raes, D; Fereres, E. 2009. AquaCrop -The FAO crop model to simulate yield response to water: I Concepts. S.l.s.e. Ag. Journal, Chapter 1. 10p.
- UNEP (United Nations Environment Programme, Francia). 2011. Water footprint and corporate water accounting for resource efficiency. París, Francia.
- Wackernagel, M; Rees, W. 1996. Our ecological footprint: Reducing human impact on the earth. Gabriola Island, British Columbia, Canadá, New Society Publishers.
- Water Footprint Network. 2015. The Water Footprint Assessment tool (en línea). S.l. s.e Consultado oct. 2016 Disponible en <http://waterfootprint.org/en/resources/interactive-tools/water-footprint-assessment-tool/>.
- Willaarts, BA; Garrido, A; Llamas, R (eds.). 2014. Water for Food Security and Well-Being in Latin America and the Caribbean: Social and Environmental Implications for a globalized economy. Earthscan studies in water resource management. ISBN 978-0415713689.
- WWF (Fondo Mundial para la Naturaleza, Suiza). 2012. Filtro de riesgo de agua (en línea). Gland, Suiza. Consultado 20 oct. 2016. Disponible en <http://waterriskfilter.panda.org/>
- Zárate, E; Kuiper, D. 2013. Evaluación de la huella hídrica del banana para pequeños productores en Perú y Ecuador (en línea). Bowil, Suiza, Good Stuff International - Switzerland. Consultado 19 oct. 2016. Disponible en [http://www.huellahidrica.org/Reports/Zarate%20and%20Kuiper%20\(2013\)%20Water%20Footprint%20Assessment%20of%20Bananas.pdf](http://www.huellahidrica.org/Reports/Zarate%20and%20Kuiper%20(2013)%20Water%20Footprint%20Assessment%20of%20Bananas.pdf).
- Zeng, Z; Liu, J; Koeneman, PH; Zarate, E; Hoekstra, AY. 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.
- Zhang, GP; Mathews, RE; Frapporti, G; Mekonnen, MM. 2014. Water Footprint Assessment for the Hertfordshire and North London Area. Londres, Reino Unido, Environment Agency. Report RESE000335.



Anexo I: Los programas CROPWAT, AQUACROP y AQUACROP-GIS:

El programa CROPWAT: http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html

El programa CROPWAT trabaja con cuatro grupos de variables:

- **Clima.** Es un conjunto de variables que permite calcular la Radiación Solar ($MJ/m^2/día$) y la Evapotranspiración de Referencia (ET_0) ($mm/día$), esta última por el método de Penman-Monteith.

La base de datos CLIMWAT 2.0 (FAO 2010b) proporciona los datos climáticos necesarios en el formato que requiere el modelo CROPWAT 8.0. Otra fuente de información disponible es LocClim 1.1 (FAO 2005), que proporciona estimaciones de las condiciones climáticas medias en lugares para los cuales no se dispone de observaciones. Incluyendo también los datos de precipitación, necesarios para los cálculos finales.

- **Cultivos.** Esta variable permite caracterizar el requerimiento de agua de cada cultivo, dependiendo de sus características morfológicas y de factores como su fecha de cosecha, longitud de los periodos de crecimiento en días, coeficientes del cultivo o factor de agotamiento.
- **Suelos.** Incluye las características del suelo donde el cultivo se desarrolla, de manera que el software pueda hacer un balance hídrico completo y calcular, posteriormente, sus necesidades de riego.

La variable precipitación efectiva del módulo programación del CROPWAT, representa el agua requerida por el cultivo y que puede ser suplida por la precipitación (Agua verde) y la variable Requerimiento Actual de Riego, representa el agua que debe ser suplida a través del riego (Agua azul).

Date	Day	Stage	Rain	Kc	Eta	Depl	Net In	Deficit	Loss	Gr. In
			mm	fact	mm/day	%	mm	mm	mm	mm
21 Apr	142	Inf	0.0	0.26	1.6	78	15.0	113.2	0.0	0.0
22 Apr	143	Inf	0.0	0.37	1.6	79	0.0	114.8	0.0	0.0
23 Apr	144	Inf	5.1	0.41	1.7	77	0.0	111.5	0.0	0.0
24 Apr	145	Inf	0.0	0.38	1.6	78	0.0	113.1	0.0	0.0
25 Apr	146	Inf	0.0	0.37	1.6	79	0.0	114.7	0.0	0.0
26 Apr	147	Inf	0.0	0.35	1.5	80	0.0	116.2	0.0	0.0
27 Apr	148	Inf	5.1	0.28	1.7	78	0.0	112.8	0.0	0.0

Totales		Precipitación total	
Lámina bruta total	27.1 mm	Precipitación total	656.0 mm
Lámina neta total	13.0 mm	Precipitación efectiva	611.5 mm
Pérdida total de riego	0.0 mm	Pérdida tot. prec.	55.2 mm
Uso real de agua del cultivo	677.2 mm	Def. de hum. en cosecha	46.7 mm
Uso pot. de agua del cultivo	1432.5 mm	Requis. reales de riego	821.8 mm
Efic. de programación de riego	100.0 %	Efic. de precipitación	91.7 %
Deficiencia de programación de riego	52.7 %		

Ilustración 3. Ejemplo de tabla de resultados de CROPWAT.

El valor de agua verde y agua azul se multiplica por 10, para calcular el requerimiento de agua del cultivo en m³/ha.

Los programas AQUACROP y AQUACROP-GIS

Disponible en <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>

AQUACROP es un modelo de productividad del agua para cultivos desarrollados por la División de Agua y de la Tierra de la FAO.

Simula la respuesta del rendimiento al agua de cultivos herbáceos, y es especialmente adecuado para abordar aquellas condiciones en las que el agua es un factor limitante clave en la producción de cultivos.

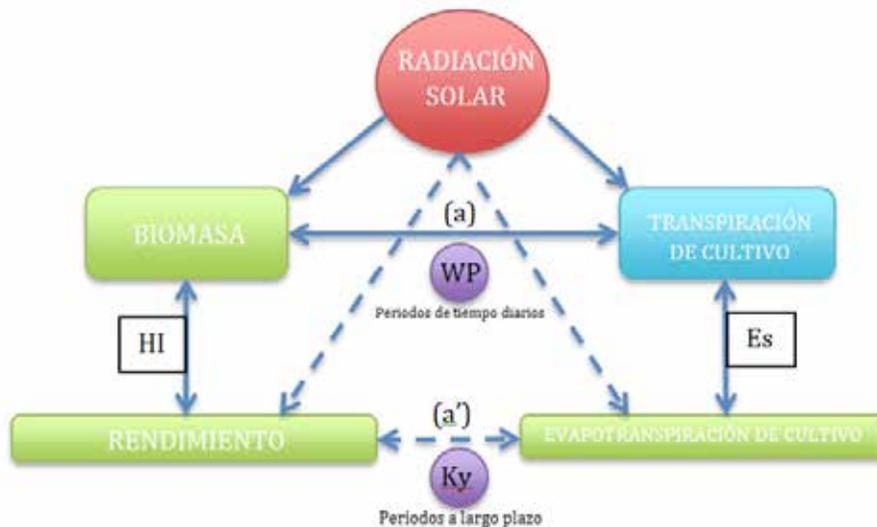


Ilustración 4: Evolución del modelo AQUACROP.

El modelo AQUACROP se basa en la introducción de dos pasos intermedios: La separación de evaporación desde el suelo, de transpiración desde el cultivo y el rendimiento obtenido desde biomasa e índice de cosecha (HI). Esta relación, que enlaza rendimiento con evapotranspiración se expresa mediante el parámetro K_y , y normalmente es aplicable a largos periodos. La relación a , enlazando biomasa a transpiración del cultivo, se expresa mediante el parámetro WP (punto de marchitez) y tiene un ámbito de aplicación temporal diaria.

AQUACROP requiere datos relativos al clima, cultivo, tipo de irrigación y de labor de campo, tipo de suelo, aguas subterráneas, y los periodos de simulación para correr el modelo y obtener resultados. El mismo programa cuenta con valores, por defecto, para muchos de los parámetros. Para insertar datos relativos a un caso concreto, es necesario procesar la información de manera previa a su inserción en el programa. Para ello, se requiere seguir los pasos estipulados en los manuales de AQUACROP.



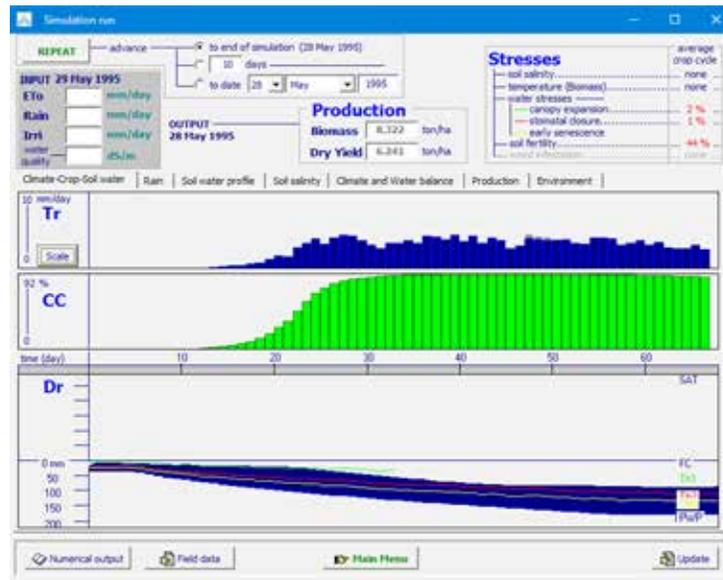


Ilustración 5. Ejemplo de resultados de AQUACROP.

AQUACROP proporciona una simulación de la transpiración por parte del cultivo, perfil de agua en el suelo, salinidad, información climática y balance de agua en el suelo, además de una simulación de la producción y productividad expresada en toneladas por m³ de agua evapotranspirada.

En caso de necesidad de realizar un gran número de simulaciones y tener que representarlas cartográficamente, AQUACROP-GIS ha sido diseñado para facilitar el uso del modelo de AQUACROP (Steduto *et al.* 2009), simplificando la tarea de generar archivos de entrada y proyectos y la gestión de los archivos de salida. AQUACROP-GIS es una herramienta que prepara los archivos de entrada necesarios, ejecuta AQUACROP, elabora los resultados y los muestra en un Sistema de Información Geográfica.

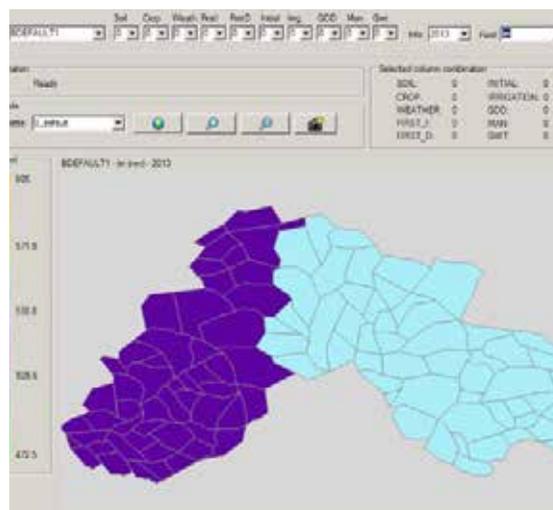


Ilustración 6. Ejemplo de resultados de AQUACROP-GIS.



ANEXO 2:

Ejemplos de aplicación de la evaluación de huella hídrica en cuenca

Este anexo tiene el objetivo de ilustrar, con ejemplos, la metodología de evaluación de huella hídrica y el uso de las herramientas que han sido explicadas en la guía metodológica. Para ello, se han escogido dos casos enfocados a productos agrícolas específicos, que ilustran con claridad la metodología mediante un enfoque a nivel de cuenca, con dos alcances diferentes y con dos fuentes de datos distintas:

- Uno de ellos con **datos reales de campo: datos sobre prácticas agrícolas tomados directamente de los pequeños productores a través de entrevistas y cuestionarios** (Banano de comercio justo producido en la región de Piura, cuenca del río Chira, Perú). En este caso, el alcance del estudio es específico para los productores, por lo que no se cuenta con información sobre el uso de agua de otros usuarios. Sin embargo, se da un enfoque de cuenca al estudio, especialmente en el análisis de sostenibilidad.
- Un segundo, utilizando información proveniente de bases de datos **globales y locales**, disponibles libremente al público, (trigo en la cuenca del río Santiago en México). En este se emplean datos globales sobre todos los usuarios de agua en la cuenca para analizar la sostenibilidad de la huella hídrica del trigo.

EJEMPLO 1

Evaluación de la huella hídrica del banano de comercio justo producido en la cuenca del río Chira, Perú

Contexto

Este estudio tiene por objeto, en primer lugar, cuantificar las huellas hídricas de la producción de banano en fincas que suministran fruta a la empresa holandesa Agrofair en Perú (banano exportado a Europa). En segundo lugar, se hace un análisis cualitativo de la sostenibilidad de esta huella hídrica¹¹, y en último lugar, se incluyen recomendaciones sobre cómo se podría alcanzar un manejo más adecuado de los recursos hídricos para la producción del banano en esta región de Perú. La meta final es proponer estrategias para la reducción de la huella hídrica y la mejoría de las prácticas agrícolas del banano en lo referente al consumo de agua.

En este ejemplo se incluyen datos de cálculo para una sola finca, con el fin de ilustrar la manera de realizar tales cálculos de huella hídrica a nivel de finca.

Se realizará un cálculo de la huella hídrica del banano empleando el modelo CROPWAT y los datos de entrada que se muestran a continuación, obtenidos desde fuentes locales y entrevistas en campo:

11. En este caso, se analizó la muestra de productores de banano dentro del contexto de la situación hídrica de la cuenca del río Chira, pero no se recolectó información específica para otros usuarios del recurso. El análisis de sostenibilidad se basó en información disponible al público a través de bases de datos globales. Por esta razón, hablamos de un análisis de sostenibilidad de la huella hídrica que es, sobre todo, cualitativo.



Datos de Entrada	
Localización geográfica	Región de Piura, provincia Sullana, cuenca del río Chira
Patrón de riego (obtenido a partir de entrevistas a agricultores)	Riego cada 3 semanas en época húmeda y cada 2 semanas en época seca
Cantidad de riego (obtenida a partir de la capacidad de bombeo)	324 m ³ /h, para 0.5 ha regadas en 3 horas
Tipo de suelo (obtenido a partir de entrevistas a los agricultores):	Franco arenoso
Rendimiento (obtenido a partir de entrevistas a agricultores)	38 t/ha

Localización geográfica



Ilustración 7. Ubicación geográfica del valle del Chira (Perú).

Empleando Google Earth y con la información de campo, se corroboró que los bananos en este caso provienen de la cuenca del río Chira (valle del río Chira). La delimitación de la cuenca y mapa del río se obtuvieron de la base de datos AQUAMAPS (FAO 2015).

Fase 1: Definición de objetivos y alcance

El objetivo inicial de este estudio consiste en contabilizar la huella hídrica azul, verde y gris para la fase agrícola de una muestra de pequeños productores de banano en la región de Piura (valle del río Chira), Perú, por tonelada de producto.

Los agricultores de banano en el valle del río Chira utilizan el agua azul para riego, que ocurre por aspersión o por inundación.

El cálculo de huella hídrica se ha basado en la metodología del *Manual de evaluación de huella hídrica* (Hoekstra *et al.* 2011) además de recolección de datos directamente sobre el terreno. La herramienta de evaluación de huella hídrica (Water Footprint Network 2015) de la Water Footprint Network, se empleó como herramienta para analizar la sostenibilidad de las huellas hídricas.

Fase 2: Contabilidad

Con el fin de determinar el consumo de agua azul (riego) y verde (proveniente de la precipitación) en la fase agrícola, se empleó el modelo CROPWAT (FAO 2015) para calcular los requerimientos de agua de los cultivos de estudio. Los datos introducidos para ejecutar CROPWAT fueron los siguientes:

Clima: En este ejemplo se emplearon bases de datos climáticas globales. Se utilizó el modelo NewLocClim (FAO 2015) para interpolar datos climáticos para las fincas de interés, con base en las estaciones climáticas identificadas por la FAO. Este modelo genera los archivos climáticos requeridos por CROPWAT.



Ilustración 8. Estaciones climáticas (azul) y plantas empacadoras de banano de la muestra de interés (rojo/morado), en la cuenca del río Chira, localizadas en Google Earth.

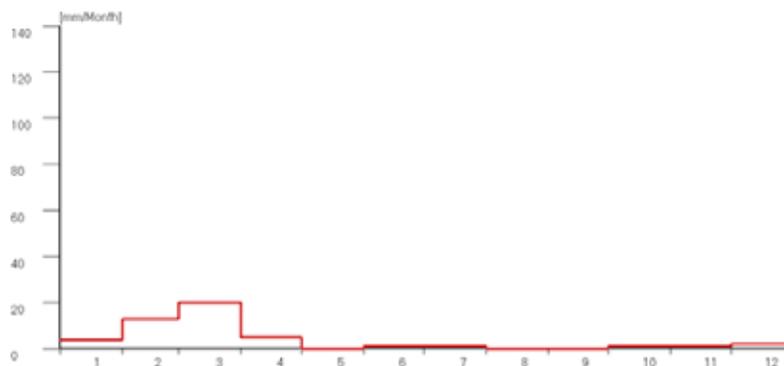


Ilustración 9. Precipitación promedio mensual (1961 – 2000) para la estación climática de San Jacinto-Piura, Perú (NewLocClim, FAO).

NOTA: Nótese que al principio del año se detecta un periodo húmedo. En general, la precipitación en esta zona es reducida.



- Suelo: Información proveniente de la visita de campo: suelo franco arenoso.
- Cultivo: Información de la base de datos global de la FAO que acompaña CROPWAT, complementada con información recolectada en campo.
- Irrigación: 324 m³/h aplicados a 0.5 ha, regadas en 3 horas. Cada tres semanas en época húmeda y cada dos semanas en época seca.

CROPWAT ofrece las siguientes opciones:

- Balance diario de agua en el suelo: Requiere información diaria de riego durante todo el ciclo del cultivo. Permite obtener la evapotranspiración real diaria.
- Incorporar cantidades de riego fijas dadas por el usuario: 324 m³/h para 0.5 ha regadas en 3 horas. Cada 3 semanas en época húmeda y cada dos semanas en época seca. Esta cantidad corresponde a 648 m³/h/ha, y para un riego de 3 horas corresponde a 1 944 m³/ha. Transformadas las unidades de m³/ha a milímetros, obtenemos un valor de 194.4 mm por aplicación, el cual debe incorporarse a Cropwat para realizar el balance de agua diario en el suelo, a lo largo de todo el periodo evaluado (el año completo, en el caso del banano).
- Una vez introducidos los datos, se puede ejecutar CROPWAT, obteniendo los siguientes resultados, que pasarán a ser interpretados para extraer, con base en ellos, las huellas hídricas verde y azul:

Crop irrigation schedule

ETo station: Bomball | Crop: BANANA 2nd year | Planting date: 01/02 | Yield red.: 27.1 %
 Rain station: Bomball | Soil: Sandy Loam | Harvest date: 31/01

Table format:
 Irrigation schedule
 Daily soil moisture balance

Timing: Irrigate at user defined intervals
 Application: User defined application depth
 Field eff.: 70 %

Date	Day	Stage	Rain	Ks	Eta	Depl	Net Ir	Deficit	Loss	Gr. Ir
			mm	fract	mm/day	%	mm	mm	mm	mm
1 Feb	1	Int	0.0	1.00	5.7	6	194.0	0.0	188.3	277.1
2 Feb	2	Int	0.0	1.00	5.7	6	0.0	5.7	0.0	0.0
3 Feb	3	Int	1.7	1.00	5.7	10	0.0	9.8	0.0	0.0
4 Feb	4	Int	0.0	1.00	5.7	17	0.0	15.5	0.0	0.0
5 Feb	5	Int	0.0	1.00	5.7	23	0.0	21.3	0.0	0.0
6 Feb	6	Int	0.0	1.00	5.7	29	0.0	27.0	0.0	0.0
7 Feb	7	Int	1.7	1.00	5.7	33	0.0	31.1	0.0	0.0

Totals

Total gross irrigation	6651.4 mm	Total rainfall	48.1 mm
Total net irrigation	4656.0 mm	Effective rainfall	44.6 mm
Total irrigation losses	3005.8 mm	Total rain loss	3.5 mm
Actual water use by crop	1730.3 mm	Moist deficit at harvest	35.5 mm
Potential water use by crop	2236.2 mm	Actual irrigation requirement	2191.5 mm
Efficiency irrigation schedule	35.4 %	Efficiency rain	92.7 %
Deficiency irrigation schedule	22.6 %		

Yield reductions

Stagelabel	A	B	C	D	Season
Reductions in ETc	22.5	14.7	25.3	0.0	22.6 %
Yield response factor	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
Yield reduction	27.0	17.6	30.3	0.0	%
Cumulative yield reduction	27.0	39.8	58.1	58.1	27.1 %

Ilustración 10. Resultados tras ejecutar CROPWAT para el caso de los bananos producidos en el valle del Chira (Perú).

A continuación, la siguiente ilustración indica los datos por tomar para la interpretación de los resultados:

Totals	
Total gross irrigation	6651.4 mm
Total net irrigation	4656.0 mm
Total irrigation losses	3005.8 mm
Actual water use by crop	1730.3 mm
Potential water use by crop	2236.2 mm
Efficiency irrigation schedule	35.4 %
Deficiency irrigation schedule	22.6 %
Total rainfall	48.1 mm
Effective rainfall	44.6 mm
Total rain loss	3.5 mm
Moist deficit at harvest	35.5 mm
Actual irrigation requirement	2191.5 mm
Efficiency rain	92.7 %

Ilustración 11. Interpretación de resultados de CROPWAT para obtener las huellas hídricas verde y azul de la producción de banano en el valle del Chira (Perú).

Evapotranspiración de agua verde = min (Requerimiento hídrico de cultivo; Precipitación efectiva) = min (2 236.2; 44.6) = 44.6

En este ejemplo, el suelo tiene un déficit de 35.5 mm de agua al momento de la cosecha. Esta agua ha sido evapotranspirada por el cultivo y se asigna a la ET verde. Entonces: Evapotranspiración total de agua verde = 44.6 + 35.5 = 80.1 mm.

Aquí se requiere tener cuidado en la interpretación de los datos de salida de Cropwat cuando este se emplea para calcular las huellas hídricas. Esto sucede porque Cropwat no es programa diseñado para el cálculo de huellas hídricas, su fin último es apoyar al agricultor en la planeación del riego. Sin embargo, el mensaje importante aquí es que cualquiera que sea la herramienta que se emplee para el cálculo de la huella hídrica, deben tenerse muy claros los conceptos de huella hídrica verde y azul, así como su propósito, con el fin de realizar la asignación correcta a cada componente.

Evapotranspiración de agua azul = min (Requerimiento de Riego; Irrigación efectiva)

Irrigación efectiva: Agua de riego verdaderamente evapotranspirada por el cultivo. En este caso, corresponde a la ET total del cultivo (1 730.3 mm) menos la ET_{verde} (80.1 mm).

Irrigación efectiva = 1 730.3 – 80.1 = 1 650.2

Evapotranspiración de agua azul = min (2 191.5; 1 650.2) = 1 650.2 mm

Una vez conocidos los datos de evapotranspiración verde y azul, se puede calcular la huella hídrica verde y azul del producto, con base en el rendimiento (38 t/ha):

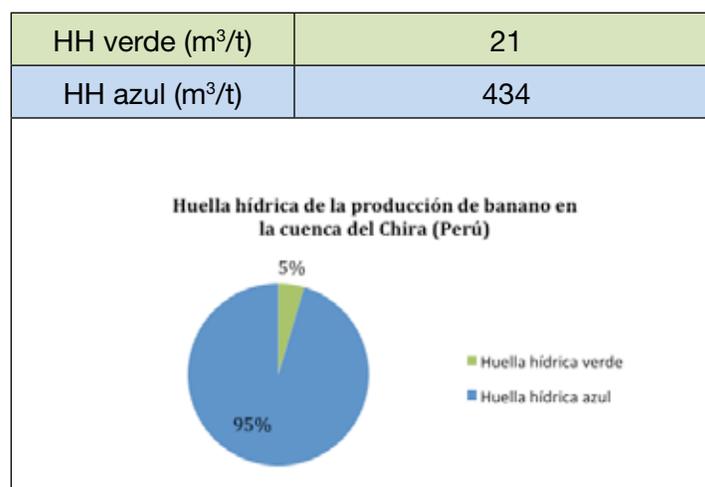
Huella hídrica azul	Huella hídrica verde
- Cambio de unidades de mm a m³/ha: 1 650.2 mm = 16 502 m³/ha	- Cambio de unidades de mm a m³/ha: 80.1 mm = 801 m³/ha
- Dividiendo por el rendimiento (38 t/ha): huella hídrica azul = 434 m³/t	- Dividiendo por el rendimiento (38 t/ha): huella hídrica verde = 21 m³/t



ET_{azul} , mm	ET_{verde} , mm	ET_{Total} , mm	Rendimiento, t/ha	HH_{azul} , m^3/t	HH_{verde} , m^3/t	$HH_{(\text{azul}+\text{verde})}$, m^3/t
1650.2	80.1	1730.3	38	434	21	455

Cuadro 12. Tabla de resultados de las huellas hídricas verde y azul para la producción de bananos en el valle del Chira (Perú).

En este caso, de la huella hídrica asociada a la cantidad de agua (azul + verde) corresponde el 95 % a la huella hídrica azul y el 5 % a la huella hídrica verde. Para el cálculo de la huella hídrica gris agrícola, puesto que toda la producción es orgánica, se asumió un porcentaje de lixiviación de N igual a cero, por lo que la huella hídrica gris es también igual a cero¹². Finalmente, los resultados (en m^3/t) serían los que se muestran a continuación:



* Para efectos de gestión del recurso en la cuenca, se recomienda reportar por separado los componentes de la huella hídrica. Se puede encontrar más información sobre las unidades de la huella hídrica en el capítulo 4 de esta guía.

En este ejemplo de contabilidad, se presentan los resultados en unidades de m^3/t , según como fue definido en los objetivos y alcance del estudio. En el caso de realizar un estudio completo a nivel de cuenca, según como se describió en los capítulos de esta guía, debe tenerse en cuenta el área total sembrada, con el fin de obtener resultados en m^3 totales consumidos por año en la producción de banano en el interior de la cuenca del río Chira. Debido a la falta de información sobre superficies totales sembradas en esta cuenca (pues este aspecto se encontró por fuera del alcance de este estudio), no fue posible elaborar este análisis. Para detalles sobre las unidades de la huella hídrica, referimos al lector al capítulo 4.

12. En otros casos, según los objetivos y alcance del estudio, es posible profundizar en la información y evaluar la lixiviación de nutrientes a partir de fertilizantes orgánicos como estiércol. En el contexto de este estudio, esta no se incluyó. La suposición de que la contribución de la producción de banano orgánico a la huella hídrica gris es cero, se consideró como válida dentro del contexto de este estudio.

Fase 3: Evaluación de sostenibilidad

El agua empleada para riego proviene de la cuenca del río Chira, a través de la represa de Poechos y el canal Miguel Checa. El río Chira se caracteriza por ser un río que desciende de las cadenas montañosas de los Andes para desembocar en el Océano Pacífico.

Para este caso, se realizó un análisis de la situación hídrica de la cuenca mediante el uso de la herramienta de evaluación de la huella hídrica (WFAT) de la Water Footprint Network. Esta herramienta tiene en cuenta las 405 cuencas principales del mundo, dentro de las cuales encontramos la cuenca del río Chira (Perú). WFAT permite analizar el estrés hídrico (agua azul) a nivel mensual, teniendo en cuenta las huellas hídricas por cuenca hidrográfica, así como los caudales ecológicos que deberían respetarse en estas. A continuación se muestra el mapa de escasez de agua azul según WFN, para la zona de interés.

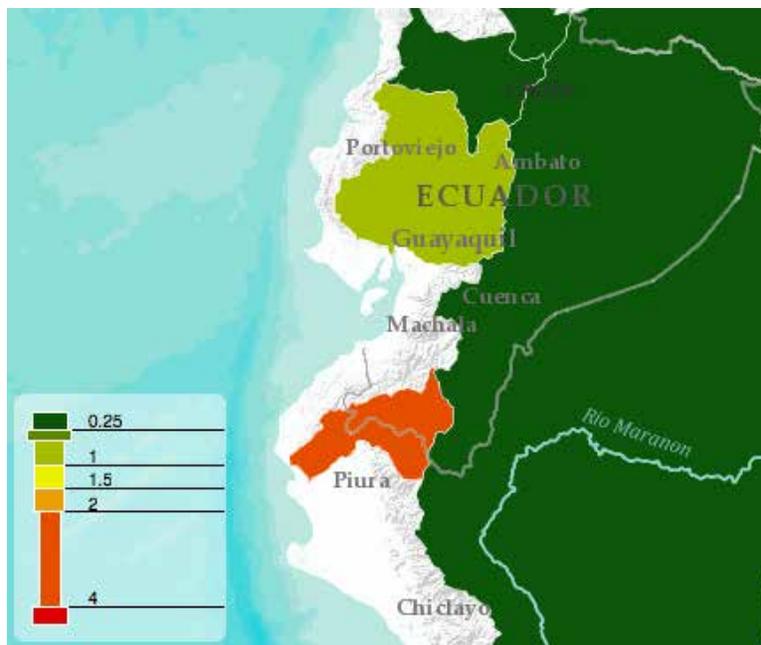


Ilustración 13. Mapa de escasez de agua azul para Ecuador y Perú (Water Footprint Network 2015).

La cuenca del río Chira se muestra representada en color rojo y muestra un valor de escasez de agua azul anual entre 2 y 4 (exactamente 2.12), según Mekonnen & Hoekstra (2011), indicando que la HH total de la cuenca es 2.12 veces mayor que el agua disponible para uso humano. Este valor indica que la situación no es sostenible pues se están consumiendo los caudales mínimos ambientales, es decir, que el agua que queda en el río impide la preservación del ecosistema. Mekonnen & Hoekstra (2011) indican además que la cuenca del río Chira sufre durante al menos 5 meses al año (de agosto a diciembre) una escasez de agua azul severa. La situación es, pues, crítica para la cuenca del río Chira. La producción de banano y el uso eficiente del agua de irrigación juegan en esta cuenca un papel importante pues esta actividad consume importantes cantidades de agua azul, provenientes de la misma cuenca. Existe una fuerte competencia por el recurso con otros cultivos como arroz y caña de azúcar (Zarate *et al.* 2013; Anexo 2).



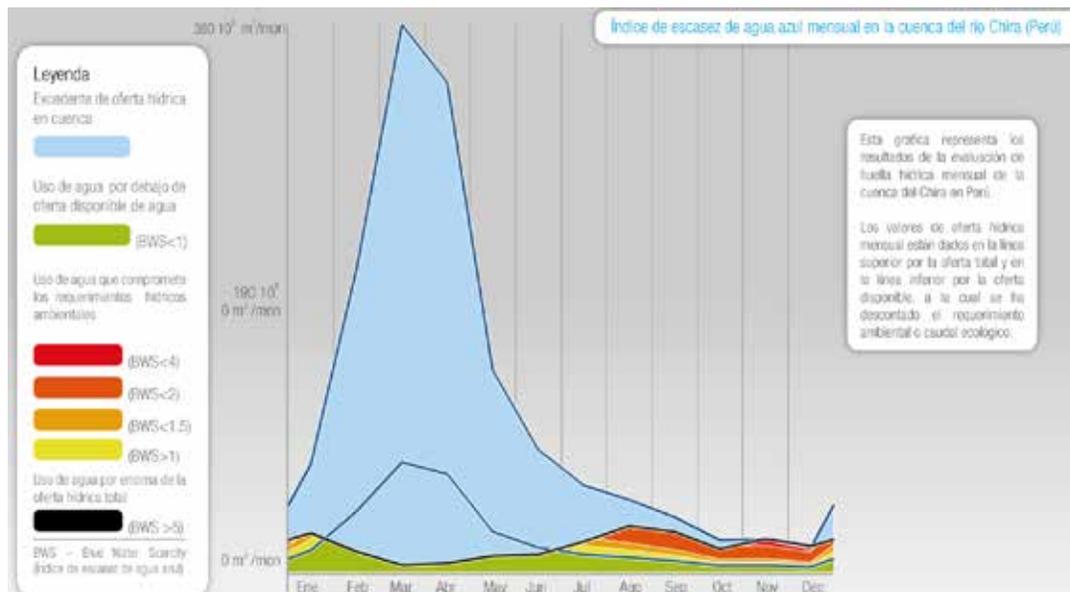


Ilustración 14. Gráfico anual de la disponibilidad de agua azul frente a la huella hídrica azul en la cuenca del río Chira (Perú)

La situación se agrava por el mal estado de la represa de Poechos, que posee problemas de sedimentación, mal mantenimiento y disminución de su capacidad de almacenamiento (Agofair Sur 2011a).

Adicionalmente, se realizó una representación de las zonas en las cuales se proyecta estrés hídrico severo para el año 2050, según el estudio realizado por Alcamo *et al.* (2007), que se puede acceder a través de Google Earth. Se puede apreciar que para la zona en la cual se encuentran ubicadas las empacadoras de la muestra Peruana (Piura, río Chira), se pronostica estrés hídrico severo.



Ilustración 15. Pronóstico de estrés hídrico severo para el año 2050 según Alcamo *et al.* (2007)

En relación con el nivel de contaminación del agua, se realizó una consulta al estudio de 1 000 cuencas por Liu *et al.* (2012), empleando el índice de contaminación del agua (water pollution level), que se refiere a la capacidad de asimilación de contaminantes que los cuerpos de agua poseen (ver el capítulo 4 de esta guía).



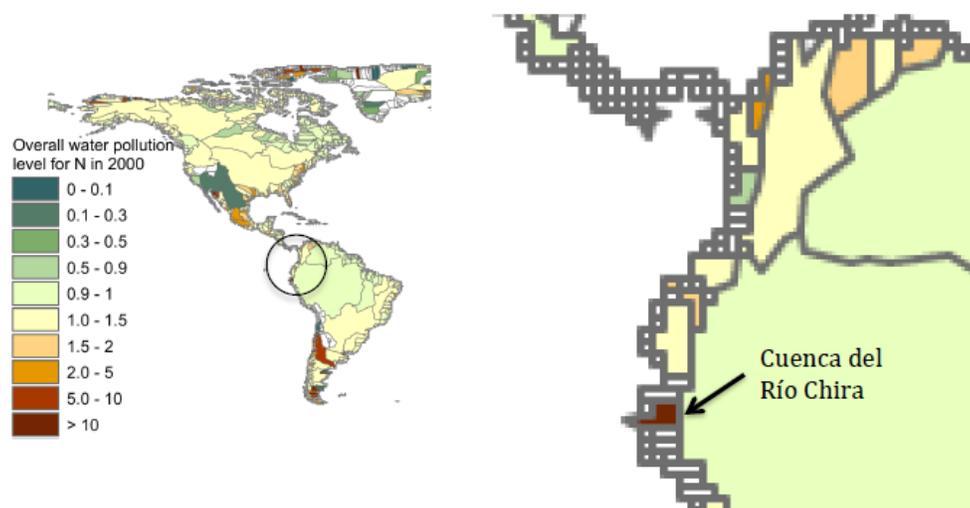


Ilustración 16. Indicador de contaminación severa para el río Chira según Liu *et al.* (2012).

Se puede observar que la zona que corresponde a la cuenca del Chira sufre una contaminación severa por nitrógeno (N). Los cultivos predominantes en la zona son mango, limón, café, banano, arroz, ciruelo, yuca, flores, uva, algodón y caña de azúcar (Zarate *et al.* 2013), y el problema de contaminación por nutrientes proviene del efecto combinado de las variadas actividades agrícolas. En relación con este estudio, se considera que al seguir las recomendaciones previas relativas a una mejor dosificación de la irrigación, se puede minimizar el problema de lavado de nutrientes. Aunque en Perú la práctica agrícola es orgánica y en este estudio se asumió que no hay lixiviación de contaminantes a partir de esta (debido a falta de información relativa a la aplicación de fertilizantes orgánicos), en la realidad puede ocurrir lixiviación y escorrentía de N en esta práctica agrícola, especialmente con las aplicaciones de irrigación actuales de la muestra, las cuales se analizarán más adelante.

El análisis muestra que la situación es grave, pues los productores manifestaron que otros cultivos como el arroz, la caña o la uva tienen prioridad de riego sobre el banano, por lo cual no es posible mantener una frecuencia de irrigación adecuada para el banano. Los productores se quejan de no poder tener mejores rendimientos debido a la falta de agua de riego.

Los resultados de la huella hídrica deben analizarse en conjunto con los datos de extracción de agua y aplicación de riego, con el fin de formular estrategias adecuadas: Los resultados de CROPWAT muestran que el cultivo de banano recibe 4 656 mm de riego durante su ciclo (eficiencia de riego es un dato de entrada al programa, 70 % valor por defecto). Sin embargo, de estos, el cultivo solo puede aprovechar 1 650 mm. El resto, regresa a la cuenca. Además, el cultivo sufre estrés hídrico, en algunos meses del año, y CROPWAT calcula una pérdida en el rendimiento debido a este estrés de 27.1 % (ver ilustración 4).

Fase 4: Estrategias de respuesta

La formulación de estrategias se plantea alrededor del análisis complementario entre la huella hídrica y otros indicadores como los rendimientos agrícolas, las extracciones de agua y la escasez de agua azul.

La revisión detallada de los resultados muestra que el problema proviene de irrigar más de la cuenta durante los turnos de irrigación, y de no irrigar con la frecuencia que el banano necesitaría para su crecimiento adecuado.

Este problema se podría mejorar considerablemente, por ejemplo, cambiando la política de distribución del agua en la región, o comprando solo el tiempo de irrigación requerido para saturar el suelo, o instalando reservorios para almacenar el agua comprada durante los turnos y distribuirla en menor cantidad con mayor frecuencia, lo cual reduciría el problema de estrés hídrico que el cultivo sufre y aumentaría el rendimiento, a la vez reduciendo la huella hídrica.

Debido a la escasez de precipitaciones en Perú y a la fuerte dependencia de la irrigación, el programa CROPWAT calcula que, en promedio, para toda la muestra de productores de banano analizados para este país, el rendimiento sufre un 34 % de reducción con respecto al rendimiento potencial máximo, para las frecuencias de irrigación establecida. Este resultado coincide con los estimativos mencionados por Zarate *et al* (2013) en los cuales se consideran pérdidas en producción en este país debido a la sequía. Con el fin de minimizar el estrés hídrico, se recomienda acondicionar pozos de recolección del agua que se puede obtener durante los turnos, para así practicar una mejor distribución del agua, incrementando la frecuencia de irrigación y disminuyendo la cantidad empleada por vez.

Como conclusión, la región estudiada en Perú, correspondiente a la cuenca del río Chira y de donde proviene el agua para irrigación, tiene un estrés hídrico importante, de al menos 5 meses al año de estrés hídrico severo. La precipitación en esta zona es mínima, razón por la cual la producción de banano depende casi totalmente de la irrigación. Por tanto, este país es el más sensible a los problemas de estrés hídrico y son más necesarios los esfuerzos en mejorar la eficiencia de la huella hídrica azul.

Perú enfrenta un futuro incierto en lo que se refiere al suministro de agua debido a cambios importantes, tanto en la población como el clima (Leavell y Portocarrero 2003; Zarate *et al.* 2013). Los cambios climáticos en Perú son particularmente marcados debido a los fenómenos de El Niño (trayendo inundaciones) y de La Niña (trayendo sequías). La situación se agrava por las condiciones ambientales y de población en la Costa Pacífica en Perú, la cual recibe precipitación raramente, pero posee un alto porcentaje de la población peruana. Otro punto crítico que agrava la situación es el mal estado de la represa Poechos, que debido a un mal mantenimiento ha disminuido su capacidad de almacenamiento, por exceso de sedimentos (Zarate *et al.* 2013).

El riego es muy ineficiente y de toda el agua vertida sobre los campos, que aparentemente es una cantidad importante, solo una pequeña proporción puede ser aprovechada por los cultivos. Puesto que no se cuenta con información más precisa, no fue posible determinar con exactitud esta proporción; el exceso de agua por evento de irrigación incrementa los impactos por lavado y lixiviación de nutrientes, mal drenaje y deterioro de los suelos. Por ello también es muy necesaria una mejora en la eficiencia y tecnificación del riego, con el objeto de conservar la sostenibilidad hídrica de la cuenca.

Este estudio ha sido realizado con datos sobre el terreno y con la inestimable ayuda y apoyo en datos y documentación de Zarate *et al.* 2013.



EJEMPLO 2

Evaluación de la huella hídrica para el cultivo de trigo en la cuenca del río Santiago en México

Contexto

En este segundo caso se evalúa la huella hídrica de la producción de trigo en la cuenca del río Santiago (México), utilizando datos globales y locales, concretamente del Distrito de Riego 11, enclavado en la subcuenca Lerma-Salamanca.

La cuenca de Santiago se localiza en el centro de México y cuenta con una población de 18 millones de habitantes y una producción de trigo que supone el 18 % del total de su territorio. La subcuenca Lerma-Salamanca, de la cual se tomaron datos específicos para este ejercicio, se encuentra en el estado de Guanajuato, que es uno de los estados más pequeños del país, pero cuenta, sin embargo, con un gran peso en la economía y productividad nacional, ocupando el noveno lugar por el valor de la producción agrícola y el quinto en ganadería (Pérez Espejo *et al.* 2013). El Distrito de Riego 11, donde se enclava el área de estudio y del que se extrajeron los datos de cultivo del trigo para los cálculos, cuenta con 112 772 ha.

La cantidad y calidad del agua es una de las grandes amenazas en esta zona, principalmente por las industrias y las refinerías localizadas en la ciudad de Salamanca. El 87 % del agua extraída en este estado se dedica al uso agrícola, principalmente trigo. Esta situación, sumada a la creciente demanda de los sectores urbano e industrial, ha dado como resultado una presión enorme sobre los recursos hídricos, resultando que en 5 meses al año existe una situación de escasez de agua severa y 1 mes de una situación de moderada escasez de agua (Mekonnen *et al.* 2015).

Los datos de entrada, obtenidos a partir de bases de datos globales y locales, son los siguientes:

Datos de Entrada	
Localización geográfica	<i>Distrito de Riego 011, Subcuenca Lerma-Salamanca, entidad federativa de Guanajuato (México), enclavada dentro de la cuenca del río Santiago</i>
Cultivo	<i>Trigo (Información de la base de datos global de la FAO que acompaña CROPWAT) Fecha de comienzo del cultivo: 15/12 Duración periodo de cultivo: 140 días</i>
Clima	<i>Tomar datos de CLIMWAT y tomar la estación climática Guanajuato.</i>
Patrón de riego	<i>Asumir la opción de Cropwat "riego a agotamiento crítico". Esta opción asume que el riego se hará en condiciones óptimas, hasta alcanzar el nivel de agotamiento crítico.</i>
Cantidad de riego	<i>Asumir la opción "reponer a capacidad de campo". Esta opción asume que el riego aplicado es suficiente para reponer la capacidad de agua del suelo.</i>
Tipo de suelo :	<i>Suelo con textura franca (Información de la base de datos global de la FAO que acompaña CROPWAT)</i>
Rendimiento	<i>6.25 t/ha</i>



Localización de la cuenca:

Mediante el uso de Google Earth o Sistemas de Información Geográfica como QGIS y la base de datos de cuencas y ríos de AQUAMAPS (FAO 2015), se localiza la cuenca en estudio (Santiago), la subcuenca en la que se localiza el cultivo con base en la información existente (Lerma-Salamanca) y el Distrito de Riego 11, área desde la cual se han obtenido datos locales para la producción de trigo.



Ilustración 17. Ubicación geográfica de la cuenca del río Santiago (México) y de la subcuenca Lerma-Salamanca y el Distrito de Riego 11.

Fase 1: Determinación de objetivos y alcance

Para este caso de estudio, el objetivo es determinar, mediante el uso de CROPWAT y de datos climáticos obtenidos mediante CLIMWAT, la huella hídrica azul y verde del cultivo de trigo en la cuenca del río Santiago (México), así como su huella hídrica gris para la contaminación por nitrógeno (N), utilizando el nivel 1 de cálculo de la huella hídrica gris (ver el capítulo 4 de esta guía) mediante la metodología establecida por el *Manual de evaluación de huella hídrica* (Hoekstra *et al.* 2011). El objetivo también será el de evaluar la sostenibilidad de las huellas hídricas azul, verde y gris de la cuenca, mediante el uso de la herramienta de evaluación de la huella hídrica (Water Footprint Network 2015).

Fase 2: Contabilidad de la huella hídrica

Para llevar a cabo la fase de contabilidad de las huellas hídricas verde y azul, es necesario recopilar primeramente los datos climáticos por incluir en CROPWAT. Para ello se utiliza el software CLIMWAT (FAO 2015), con bases de datos climáticas de más de 25 años de estaciones en todo el mundo. Se busca la estación más cercana al área de estudio, la de Guanajuato, y se exportan los datos de clima y precipitación de la estación mencionada:



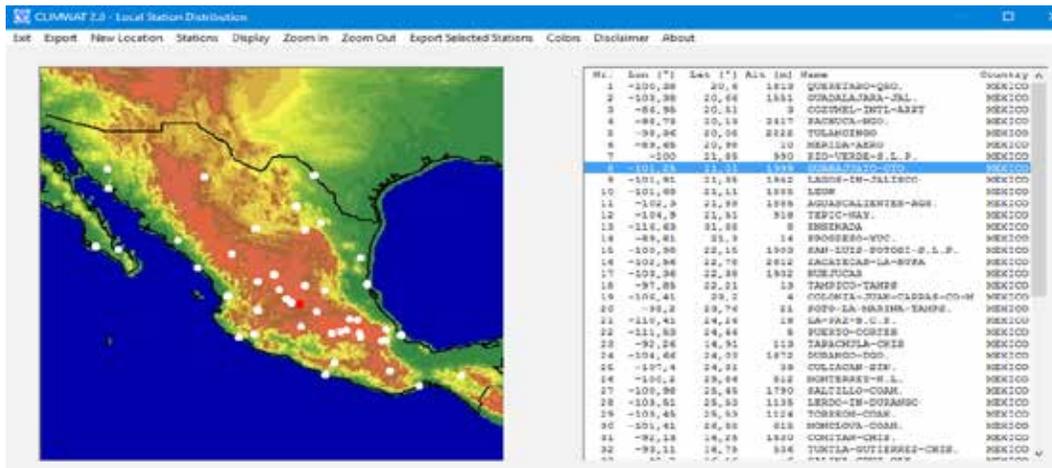


Ilustración 18. Estaciones climáticas existentes en CLIMWAT para México con estación de Guanajuato seleccionada.

Posteriormente, se procede a introducir en CROPWAT los datos extraídos de clima, de suelo (Se asume suelo medio, cargando los datos ya incluidos en la base de datos de CROPWAT), y de cultivo, también incluyendo los datos existentes para trigo en la base de datos de CROPWAT, pero modificando la fecha de siembra a 15 de diciembre y la etapa de ciclo vegetativo a 140 días (Pérez Espejo *et al.* 2013).

Una vez introducidos todos los datos, se ejecuta CROPWAT, obteniendo los siguientes resultados:

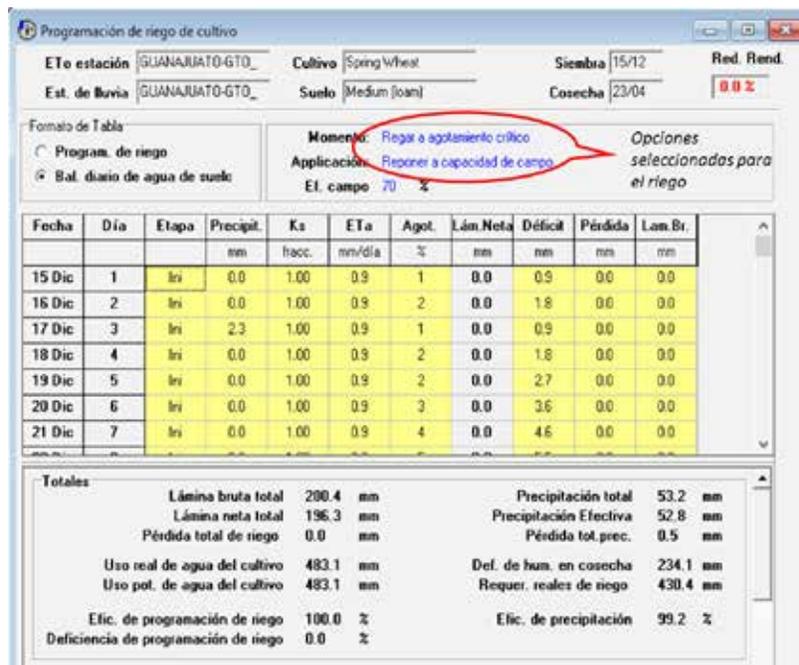


Ilustración 19. Archivo de Salida de CROPWAT para el cultivo de trigo en la cuenca del río Santiago (México).



Llegados a este punto, es importante aclarar algunos términos que difieren de las fórmulas empleadas para la contabilidad de las huellas hídricas verde y azul, según el *Manual de evaluación de huella hídrica* (Hoekstra *et al.* 2011) y la versión en español del software CROPWAT. Las huellas hídricas verde y azul se calculan según las fórmulas:

Evapotranspiración de agua verde = \min (Requerimiento Hídrico de cultivo, Precipitación efectiva)
 Evapotranspiración de agua azul = \min (Requerimiento de Riego, Irrigación efectiva)
 Cuyos parámetros, según la terminología empleada en el modelo Cropwat, corresponden a:

Requerimiento hídrico del cultivo = Uso potencial de agua del cultivo

Precipitación efectiva = Precipitación efectiva

Requerimiento de riego = Requerimientos reales de riego

Irrigación efectiva = Lámina neta total

ATENCIÓN: Cropwat calcula la deficiencia de humedad en el suelo en el momento de la cosecha. En el cálculo de la huella hídrica, se entiende que esta agua también fue consumida por el cultivo, y más tarde se recuperará durante la estación de lluvias para el cultivo del siguiente año. Este consumo debe contabilizarse y asignarse. En este ejemplo se le asigna a la huella hídrica verde del cultivo.

Una vez realizadas las necesarias aclaraciones, se procede a realizar los cálculos de las huellas hídricas verde y azul:

Totales			
Lámina bruta total	280.4	mm	
Lámina neta total	196.3	mm	
Pérdida total de riego	0.0	mm	
Uso real de agua del cultivo	483.1	mm	
Uso pot. de agua del cultivo	483.1	mm	
Efic. de programación de riego	100.0	%	
Deficiencia de programación de riego	0.0	%	
			Precipitación total 53.2 mm
			Precipitación Efectiva 52.8 mm
			Pérdida tot.prec. 0.5 mm
			Def. de hum. en cosecha 234.1 mm
			Requer. reales de riego 430.4 mm
			Efic. de precipitación 99.2 %

Ilustración 20. Archivo de salida de CROPWAT, con los componentes necesarios para el cálculo de las huellas hídricas verde y azul resaltados

Evapotranspiración de agua verde = \min (Requerimiento Hídrico de cultivo; Precipitación efectiva) = \min (483.1; 52.8) = 52.8

En este ejemplo, el suelo tiene un déficit de 234.1 mm. de agua al momento de la cosecha. Esta agua ha sido evapotranspirada por el cultivo y se asigna a la evapotranspiración verde. Entonces:

Evapotranspiración total de Agua Verde = $52.8 + 234.1 = 286.9$ mm

Evapotranspiración de Agua Azul = \min (Requerimiento de Riego, Irrigación efectiva o lámina neta total)

Irrigación efectiva: Agua de riego verdaderamente evapotranspirada por el cultivo. En este caso, corresponde a la evapotranspiración total del cultivo (483.1 mm) menos la evapotranspiración verde (286.9 mm).

Irrigación efectiva = $483.1 - 286.9 = 196.2$



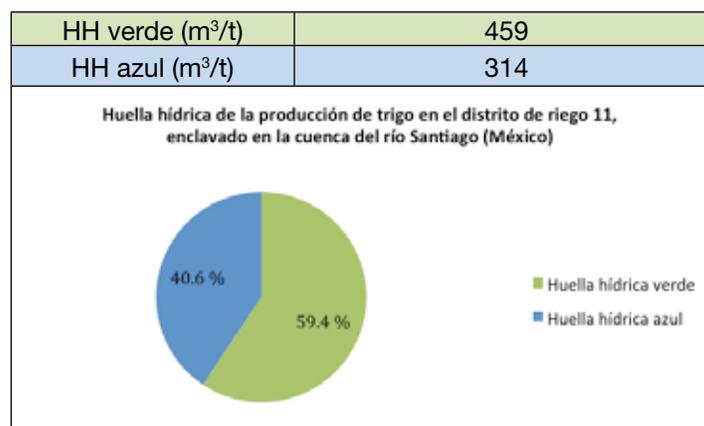
Evapotranspiración de Agua Azul = $\min(430.4; 196.2) = 196.2 \text{ mm}$

Una vez conocidos los datos de evapotranspiración verde y azul, se puede calcular la huella hídrica para la producción de trigo, introduciendo el dato de entrada de rendimiento:

Huella hídrica azul	Huella hídrica verde
- Cambio de unidades de mm a m ³ /ha: 196.2 mm = 1 962 m ³ /ha	- Cambio de unidades de mm a m ³ /ha: 286.9 mm = 2 869 m ³ /ha
- Dividiendo por el rendimiento (6.25 t/ha): huella hídrica azul = 314 m ³ /t	- Dividiendo por el rendimiento (6.25 t/ha): huella hídrica verde = 459 m ³ /t

ET_{azul} , mm	ET_{verde} , mm	ET_{Total} , mm	Rendimiento, t/ha	HH_{azul} , m ³ /t	HH_{verde} , m ³ /t	$HH_{(\text{azul+verde})}$, m ³ /t
196.2	286.9	483.1	6.25	314	459	773

En este caso, de la huella hídrica (azul + verde) el 40.6 % corresponde a la huella hídrica azul y el 59.4 % a la verde.



* Dependiendo de los objetivos del estudio, puede ser de interés sumar las huellas hídricas en un total de agua consumida por tonelada de producto, por ejemplo, en este caso se obtiene un valor de 773 m³/t. Esto se puede hacer si se quiere comparar, por ejemplo, las huellas hídricas totales de todos los productores de trigo en la cuenca, o para elevar conciencias de cara a los consumidores. Para efectos de gestión del recurso en la cuenca, se recomienda reportar por separado los componentes de la huella hídrica. Se puede encontrar más información sobre las unidades de la huella hídrica en el capítulo 4 de esta guía.

Para el cálculo de la huella hídrica gris, se aplica la fórmula establecida según el *Manual de evaluación de huella hídrica* (Hoekstra et al. 2011). Dicho manual establece 3 niveles de complejidad, y en este caso se utiliza el nivel 1, que establece un 10 % de fracción de lixiviación para determinar los contaminantes que llegan a los cuerpos de agua. Además, se emplea la norma de calidad ambiental para Nitrógeno de 10 mg/l (medidos como Nitrógeno; EPA, 2005). La fórmula por utilizar es la siguiente:

$$WF_{\text{proc, grey}} = \frac{(\alpha \times AR) / (c_{\text{max}} - c_{\text{nat}})}{Y}$$

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Ilustración 21. Cálculo de la huella hídrica gris para la producción de trigo en la cuenca del río Santiago (México)

Huella hídrica gris	
<p>- Tasa media de aplicación de fertilizante (AR) x fracción de lixiviación (α):</p> <p>$130 \times 0.1 = 13 \text{ kg/ha}$. Como la base de cálculo es 1 ha., = 13 kg</p> <p>$C_{nat} = 0 \text{ mg/l}$</p> <p>$C_{max} = 10 \text{ mg/l}$. Transformado a kg son 0.00001 kg/l</p> <p>$13/0.00001 = 1\,300\,000 \text{ litros}$</p> <p>Huella hídrica gris total del trigo = $1\,300 \text{ m}^3$</p> <p>- Dividiendo por la producción (Rendimiento = 6.25 t/ha, base de cálculo 1 ha, producción = 6.25 t (se entiende que es por año):</p> <p>Huella hídrica gris = $208 \text{ m}^3/\text{t}$</p>	

Tasa media de aplicación de fertilizante *	Area	Fertilizante total aplicado	Lixiviación de N a cuerpos de agua ($\alpha = 10\%$)	Concentración Máxima (C_{max})**	HH gris total del trigo	Producción***	HH gris de producción de trigo
kg/ha	ha	t/año	t/año	mg/l	m ³ /año	t/año	m ³ /t
130	1	0.13	0.013	10	1300	6.25	208

Los datos de entrada necesarios para llevar a cabo el cálculo han sido:

*Tasa media de aplicación de fertilizante (FAO 2006)

**Concentración Máxima (C_{max}) (EPA 2005)

***Producción (Pérez Espejo, et al. 2013).

Notas adicionales:

- Los requisitos reales de riego están referidos a la lámina neta total + deficiencia de humedad en cosecha. La huella hídrica asigna esta última a la evapotranspiración verde ya que asume que tras la cosecha no va a regarse más, y asume que al comenzar la próxima cosecha el suelo se encuentra a capacidad de campo. Esto es el resultado de la opción utilizada en CROPWAT para el uso en capacidad de campo.
- Este es un ejemplo académico que se ha realizado mediante datos globales. Los resultados a nivel local, empleando datos de campo, pueden variar. Sin embargo, los resultados son comparables a distintos estudios como el de Mekonnen & Hoekstra (2010).
- Como superficie, se ha utilizado 1 hectárea como base de cálculo
- Respecto a la huella hídrica gris, se han utilizado los valores referentes a Nitrógeno, como contaminante principal.



Fase 3: Evaluación de sostenibilidad

Este caso de estudio ha sido realizado, como se ha mencionado anteriormente, utilizando datos recopilados desde la documentación y bibliografía local, y con base en la información global que existe procedente de Water Footprint Network y de la herramienta de evaluación de la huella hídrica (Water Footprint Network 2015), además del reporte “Sustainability, Efficiency and Equitability of Water Consumption and Pollution in Latin America and the Caribbean” (Mekonnen *et al.* 2015). Estos datos, junto con los valores obtenidos en la contabilidad realizada en la fase 2, permiten realizar una interpretación de los resultados.

De acuerdo con los datos obtenidos desde el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo-Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, la superficie de producción de trigo de invierno en 2006 fue de aproximadamente 4 200 000 hectáreas, para la cuenca de Santiago-Lerma (CIMMYT 2008).

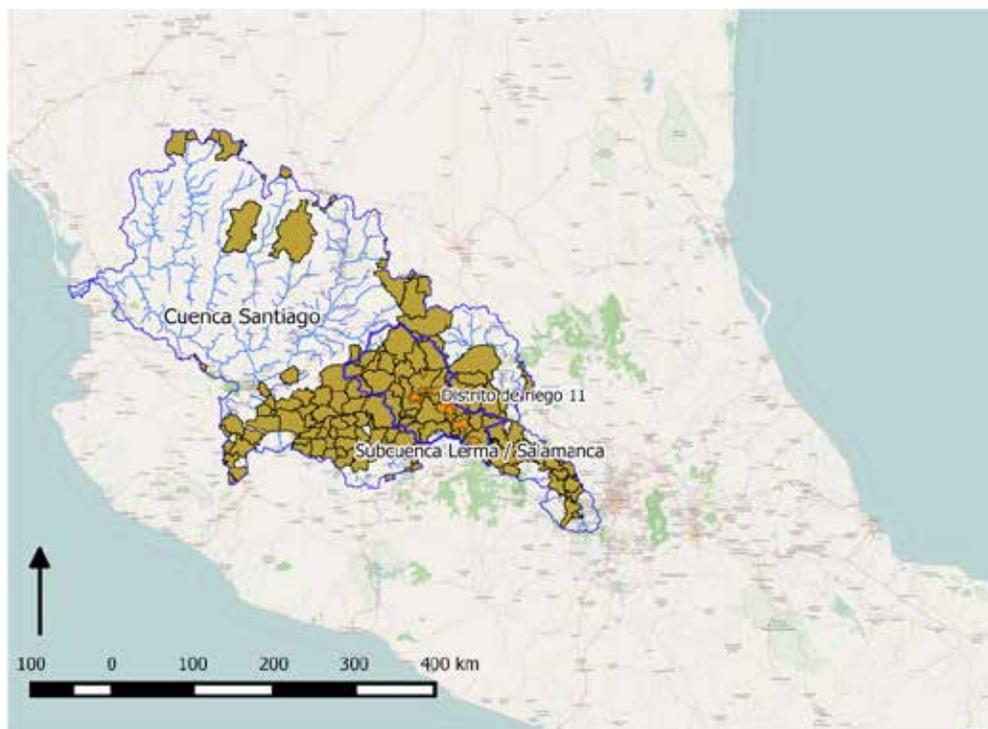
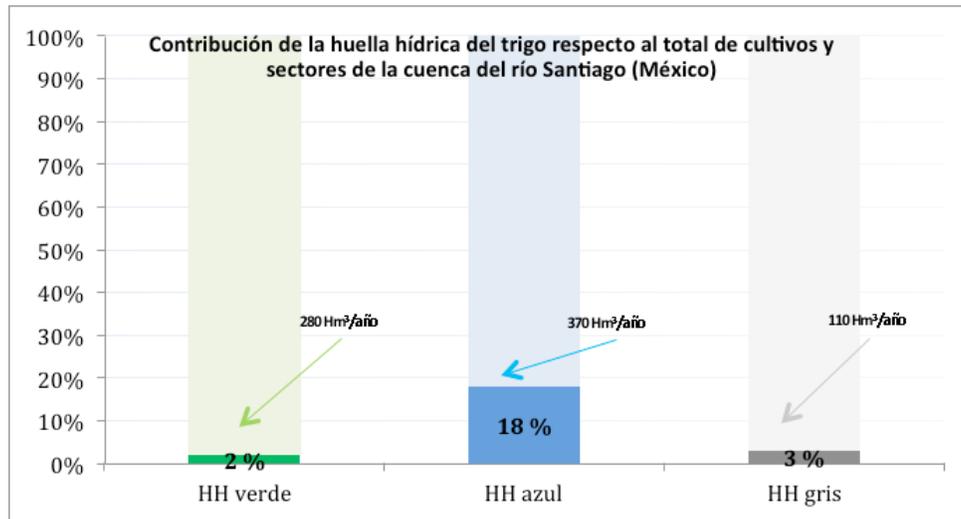


Ilustración 22. Superficie de producción de trigo para invierno en 2006.

En el mapa se puede identificar la superficie de producción de trigo para invierno en 2006 (en color marrón) dentro de la cuenca del río Santiago (México). Superpuesto en color naranja se encuentra el área del Distrito de Riego 11, desde el cual los datos para los cálculos fueron extraídos. Para el análisis se ha utilizado la herramienta de evaluación de la huella hídrica (Water Footprint Network 2015), mediante la cual se puede visualizar una evaluación geográfica para la huella hídrica del trigo en la cuenca. Mediante dicha herramienta, se obtienen los siguientes valores:



Mekonnen *et al.* (2015) reportan que el trigo contribuye con el 18 % de la huella hídrica azul total de la cuenca, con 370 millones de m³/año. El trigo tiene la mayor contribución de huella hídrica azul, seguido por los cultivos forrajeros (15 %), cebada (13 %) y el consumo doméstico (12 %). En el caso del componente verde, el trigo contribuye con el 2 % de toda la huella hídrica verde de la cuenca, con 280 millones de m³/año. Por último, en el caso del componente gris por nitrógeno, el trigo contribuye con el 4 % de la huella hídrica gris ocasionada por este contaminante en la cuenca, con 760 millones de m³/año.

Esta herramienta muestra que la cuenca sufre escasez de agua azul durante 5 meses, concretamente en los meses de invierno-primavera, ya que la herramienta permite visualizar la situación de escasez de agua, mes por mes.



Ilustración 23. Número de meses con situación de escasez de agua azul en la cuenca del río Santiago (México)



Como se puede observar en el gráfico siguiente, en los meses de febrero a junio existe una situación de escasez de agua azul, por lo cual el caudal ecológico no es respetado.

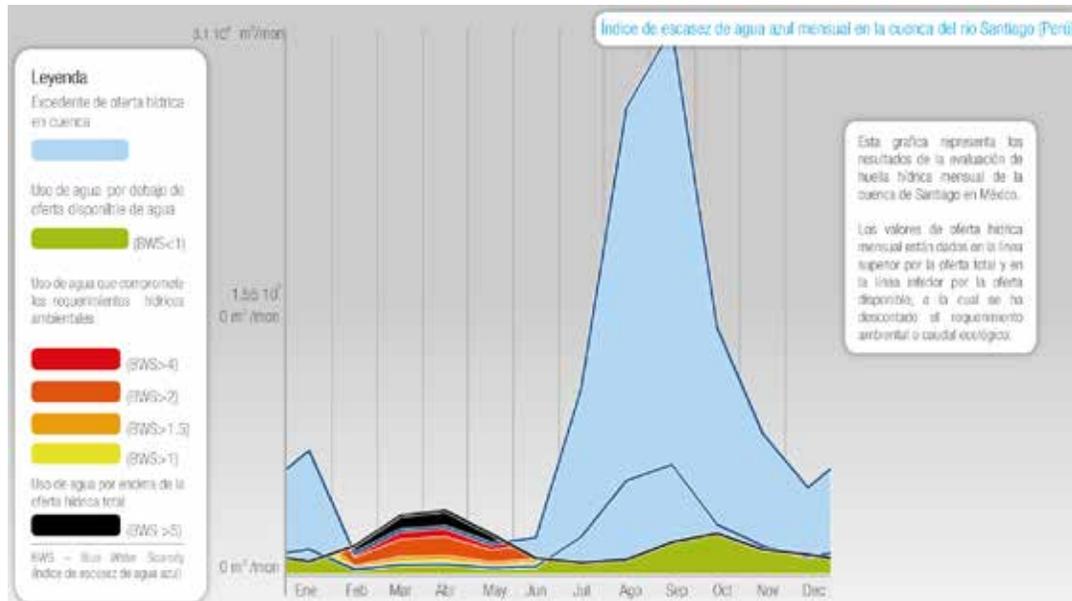


Ilustración 24. Gráfico anual de la disponibilidad de agua azul frente a la huella hídrica azul en la cuenca del río Santiago (México).

De acuerdo con la misma herramienta, se muestran las áreas cultivadas de trigo en la cuenca y sus diferentes huellas hídricas, pudiéndose observar que los valores más altos se encuentran en la zona alta de la cuenca, de donde se obtuvo parte de los datos para la fase de contabilidad.



Ilustración 25. Huella hídrica azul del trigo en la cuenca del río Santiago (México).





Ilustración 26. Huella hídrica verde del trigo en la cuenca del río Santiago (México).

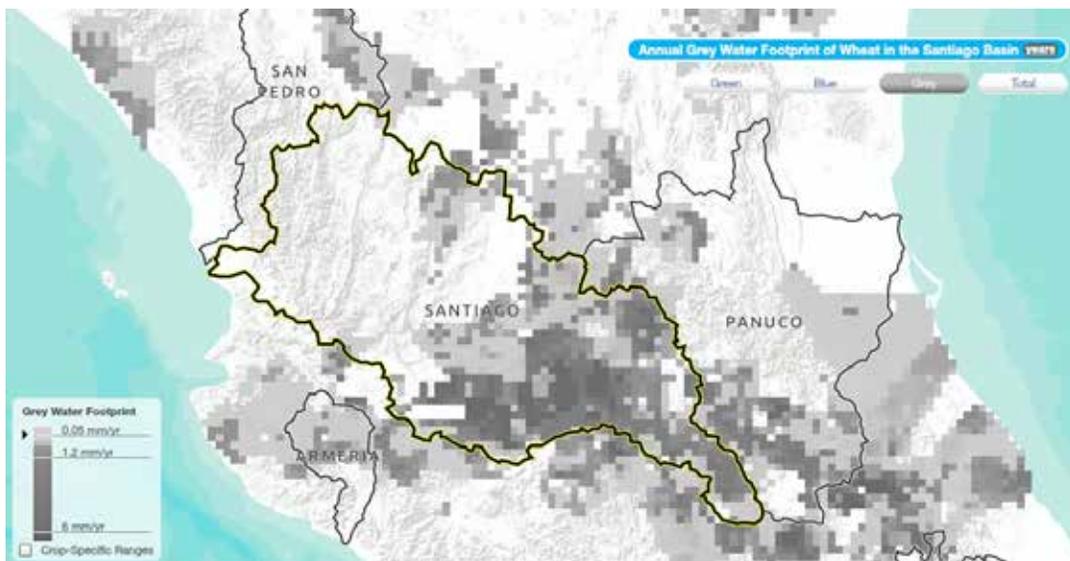


Ilustración 27. Huella hídrica gris del trigo en la cuenca del río Santiago (México).

Fase 4: Estrategias de respuesta

Como se ha podido observar tras el análisis de sostenibilidad, existe una situación en la que la producción de trigo de invierno se realiza en meses cuando se presenta un periodo de escasez severa de agua azul, por lo que las estrategias de respuesta deberían ir encaminadas a buscar una mayor productividad del agua verde, con el objeto de depender menos del agua azul.

Como ya se ha mencionado en esta guía metodológica, para el sector agrícola es posible tomar una serie de medidas como las que se enumeran a continuación:



- Aumentar la productividad de la tierra en la agricultura de secano mediante la mejora de prácticas agrícolas, aumentando la productividad del agua (t/m^3) y reduciendo así la huella hídrica verde.
- Mejora de técnicas de riego y de programación de este para reducir la huella hídrica azul.
- Reducir o abandonar (mediante la práctica de la agricultura ecológica) la aplicación de fertilizantes y pesticidas con el objeto de reducir la huella hídrica gris.
- Adoptar técnicas agrícolas que permitan mejorar los suelos y el compostaje para reducir la lixiviación y la escorrentía
- Selección de cultivos más apropiados a las condiciones locales.
- No obstante, este caso debería ser complementado con un estudio más profundo del resto de actores locales, ya que para llevar a cabo una estrategia de respuesta apropiada debe realizarse de manera integrada a nivel de cuenca, por lo tanto, las acciones no deben ser establecidas de manera aislada, sino de manera conjunta e integradora entre los distintos actores implicados en la cuenca. Por ello, es necesario integrar a los actores principales en el proceso de toma de decisiones y en la formulación de las soluciones.



*Impreso en la Imprenta del IICA
Sede Central, San José, Costa Rica
Tiraje: 500 ejemplares*



Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)
Sede Central. San José, Vázquez de Coronado,
San Isidro 11101-Costa Rica, América Central
Apartado 55-2200
Teléfonos: + (506) 2216-0188 / 2216-0194
Fax: (506) 2216-0233

