



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estimación de la huella hídrica en la extracción de caliza a cielo abierto y propuesta de una política de integración sostenible del recurso hídrico – caso planta Rioclaro, Argos

XIMENA VANESSA ECHEVERRI BEDOYA

**Universidad Nacional de Colombia
Facultada de Minas, Escuela de geociencias y medio ambiente
Medellín, Colombia
2014**

Estimación de la huella hídrica en la extracción de caliza a cielo abierto y propuesta de una política de integración sostenible del recurso hídrico – caso planta Rioclaro, Argos

XIMENA VANESSA ECHEVERRI BEDOYA

Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de: Magíster en Ingeniería - Recursos Hidráulicos

Director
Oscar Jaime Restrepo Baena IMM, MSc. Ph.D.
Depto. de Materiales y Minerales
Facultad de Minas

MAESTRÍA EN INGENIERÍA - RECURSOS HIDRÁULICOS
ESCUELA DE GEOCIENCIAS Y MEDIO AMBIENTE
FACULTAD DE MINAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN
2014

Dedico este trabajo a mi familia,
en especial a mi hermana por todo su apoyo invaluable.

Expreso mi más profundo agradecimiento
a mi director de tesis, Oscar Jaime Restrepo Baena
por toda su colaboración, comprensión y acompañamiento
durante la elaboración de esta investigación.

Estimación de la huella hídrica en la extracción de caliza a cielo abierto y propuesta de una política de integración sostenible del recurso hídrico – Caso Planta Rioclaro, Argos

Ximena Vanessa Echeverri Bedoya
xvecheverrib@unal.edu.co

Resumen

A partir de una revisión de los métodos, enfoques y herramientas de literatura relacionados con la huella hídrica, esta investigación logró realizar una primera aproximación a la determinación de la huella hídrica de la industria del cemento, tomando como caso de estudio la planta Rioclaro de Cementos Argos, además de estimar los colores de la huella hídrica azul, verde y gris para cada uno de los procesos considerados tales como extracción de minerales, producción de cemento, autogeneración de energía y procesos auxiliares. Lo anterior se cuantificó con información suministrada por la misma compañía y por medio de validaciones en campo, tomando como punto de partida el balance hídrico y la determinación de “hotspots”. El análisis de los usos y contaminación del agua se desarrolló bajo la metodología elaborada por la Water Footprint Network –WFN–, para la caracterización del nivel de estrés hídrico y *hotspots* se hizo uso de la herramienta desarrollada por el WBCS, conocido como la Global Water Tool – GWT, y para la identificación y calificación de impactos, asociados al consumo de agua y vertimientos, se toma la metodología de Conesa Fernandez. Los resultados muestran, al hacer la distinción por los colores, que la huella hídrica azul es la categoría más relevante para el proceso de producción de cemento, como consecuencia de la alta demanda de energía. Igualmente, se demuestra que resulta relevante incluir en el análisis la huella hídrica verde, debido al consumo de materias primas *naturales*.

Palabras clave: *Huella hídrica, Industria cementera, Hotspots, Sostenibilidad*

Abstract

From a thorough review of methods, approaches and tools related literature water footprint, this research it was possible to make a first approach to the determination of the water footprint of the cement industry, taking as a case study the Rioclaro plant owned by Cementos Argos, in addition to estimating the colors of the water footprint blue, green and gray of each the processes considered like mining, cement production, energy self-generation and auxiliary processes. This was quantified with information provided by the same company and through field validations, taking as its starting point the water balance and identifying *hotspots*. The analysis of uses and water pollution under the methodology developed by the Water Footprint Network -WFN-, to characterize the level of water stress and *hotspots* made use of the tool developed by the WBCS, known as the Global Water Tool - GWT, and for the identification and classification of impacts associated with water use and discharges, is taken methodology Conesa Fernandez. The results show, to make the distinction by the colors, the blue water footprint is the most relevant to the cement production process category, due to the high demand of energy. It also shows that it is relevant to include in the analysis the green water footprint due to the consumption of natural raw materials.

Keywords: *Water footprint, Cement industry, Hotspots, Sustainability*

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. ESTADO DEL ARTE	9
2.1. Antecedentes de la Huella Hídrica.....	9
2.2. El concepto de Huella Hídrica.....	11
2.3. Los colores del agua.....	12
3. EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA	13
3.1. Definición de los objetivos y el alcance.....	13
3.2. Contabilidad de la huella hídrica.....	14
3.3. Evaluación de la sostenibilidad.....	15
3.4. Formulación de respuestas.....	15
4. ENFOQUES Y METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA HÍDRICA.....	15
4.1. Enfoques de abajo hacia arriba	16
4.2. Enfoques de arriba hacia abajo	17
4.3. Métodos y herramientas para medir el uso del agua y sus impactos	18
4.3.1. Metodología de la Huella hídrica de la WFN.....	18
4.3.2. Enfoques independientes para la estimación de los impactos del uso del agua basados en la huella hídrica de la WFN.....	20
4.3.3. Enfoques de ACV para la estimación de los impactos del uso del agua	21
4.3.4. El método Ecológico de la Escasez.....	22
4.3.5. El enfoque de Milà i Canals et al.....	22
4.3.6. El enfoque de Pfister et al.....	23
4.3.7. Norma ISO 14046.....	24
4.3.8. The Global Water Tool – WBCSD.....	24
5. LA HUELLA HÍDRICA DE COLOMBIA EN EL CONTEXTO MUNDIAL, CONTINENTAL Y SURAMERICANO	25
5.1. La huella hídrica en la industria del cemento	26
6. DESARROLLO METODOLÓGICO	27
6.1. Localización del área de estudio.....	27
6.2. Desarrollo del estudio	28
6.2.1. Análisis de Estrés Hídrico.....	29
6.2.2. Cálculo de la huella hídrica.....	31
6.2.3. Huella hídrica azul.....	34
6.2.4. Huella hídrica verde.....	35
6.2.5. Huella hídrica gris.....	35
6.3. Evaluación de impactos.....	36
6.4. Sostenibilidad de la huella hídrica.....	38
7. RESULTADOS	38
7.1. Análisis de estrés hídrico	38
7.2. Balance de agua.....	41
7.3. Huella hídrica.....	42
7.3.1. Huella hídrica azul.....	43
7.3.2. Huella hídrica verde.....	43
7.3.3. Huella hídrica gris.....	44
7.3.4. Huella hídrica Total.....	45
7.4. Evaluación de impactos.....	46
7.5. Sostenibilidad de la huella hídrica.....	47
8. CONCLUSIONES	48

9. RECOMENDACIONES	49
--------------------------	----

TABLAS

Tabla 1. Estaciones de registro hidrológico empleadas en el estudio. IDEAM	30
Tabla 2. Concentraciones máximas permisibles	36
Tabla 3. Rangos de calificación de los criterios.....	37
Tabla 4. Valoración de la importancia del impacto.	38
Tabla 5. Series de caudales mínimos estimados versus caudal requerido.....	40
Tabla 6. Balance de agua	41
Tabla 7. Componentes de la huella hídrica de los procesos y totales	42
Tabla 8. Impactos ambientales potenciales sobre el componente agua.....	46

FIGURAS

Figura 1. Esquema de contextualización geográfica del área de estudio sin escala	28
Figura 2. Ubicación de las cuencas estudiadas	31
Figura 3. Diagrama de flujo de los procesos. Planta Rioclaro.	33
Figura 4. Total de recurso de agua renovable para la planta Rioclaro GWT	39
Figura 5. <i>Hotspots</i> de biodiversidad GWT.....	39
Figura 6. Huella hídrica azul de los procesos.....	43
Figura 7. Huella hídrica verde de los procesos	44
Figura 8. Huella hídrica gris de los procesos	45
Figura 9. Huella hídrica total de los procesos	45
Figura 10. Huella hídrica por tonelada de cemento.....	46

ECUACIONES

Ecuación 1. Formula para el cálculo de la huella hídrica azul	34
Ecuación 2. Formula para el cálculo de la huella hídrica verde.....	35
Ecuación 3. Formula para el cálculo de la huella hídrica gris.....	35
Ecuación 4. Importancia del impacto	37

1. INTRODUCCIÓN

La planeación de los recursos naturales renovables y no renovables se contextualiza dentro del concepto de desarrollo sostenible y es el aspecto dominante en todos los procesos de planeación, con el fin de optimizar la producción razonable y satisfacer necesidades diversas de la sociedad (Abdi y Namin, 2008). Lo anterior permite evidenciar que el uso de los recursos implica una relación natural – antrópica, es decir se relaciona con el espacio y lo que ocurre en él; siendo necesario considerar las diferentes dimensiones dentro de las que se define el espacio: ambiental, económico, político, social y cultural.

Teniendo claro que el agua es un recurso que se hace cada vez más escaso y menos disponible en calidad y cantidad para los diversos usos, y en pro de conocer los impactos asociados al consumo de agua, surge el concepto de huella hídrica, el cual es un indicador de uso de agua en el que se involucra el uso directo e indirecto por un consumidor o productor, teniendo en cuenta los volúmenes de agua consumida y contaminada en los diferentes pasos de la cadena de suministro (Hoekstra, Chapagain, Aldala, & Mekonnen, 2011).

Desde que se introdujo la idea de la huella ecológica (Wackernagel y Rees, 1996), se ha establecido como un concepto de la medición de la sostenibilidad de las naciones, las regiones, las ciudades, las personas, los bienes industriales, entre otros. Si bien, hasta ahora, los reportes de la información son voluntarios y son escasos los índices, tampoco se ha logrado establecer una línea base para los diferentes sectores ni se ha medido con rigor la huella hídrica asociada a la producción de cemento y los procesos contenidos en esta. Hasta ahora se han logrado establecer acciones concretas frente a las actividades más impactantes en medio del piro proceso, pero aún falta avanzar frente a los procesos paralelos de la cadena productiva como son el transporte del producto terminado, la actividad minera y los demás procesos asociados.

Los análisis más detallados y aproximaciones más cercanas desarrolladas en los últimos tiempos son el análisis del ciclo de vida del producto y las declaraciones ambientales del producto, las cuales son muy limitadas y más en países en vía de desarrollo, donde hasta el momento dichas declaratorias no juegan un papel diferenciador.

A nivel mundial, en la industria del cemento, la huella hídrica es relativamente pequeña en comparación con otros sectores, aunque no se había logrado un análisis detallado en lo que respecta a los procesos que la componen. Es por esto que se desarrolla un estudio minucioso que permite establecer el balance de agua en los diferentes procesos considerados para la fabricación de cemento, la identificación del riesgo hídrico en la zona de estudio y los impactos asociados a dicha actividad. En donde además se establecieron las variables ambientales que inciden en el proceso de explotación de los minerales como caliza, esquisto y arcilla, autogeneración de energía, producción de cemento y procesos auxiliares, se determinaron las relaciones entre dichas variables, se identificaron los aspectos e impactos ambientales asociados al recurso hídrico y se establece la línea base del recurso hídrico en la zona de estudio.

El presente trabajo se centra en el cálculo de los diferentes colores de la huella hídrica involucrados en la producción de cemento, tomando como caso de estudio la planta Rioclaro de cementos Argos y los procesos de extracción de minerales, producción de cemento, autogeneración de energía y procesos auxiliares que se llevan a cabo en

ella. Esta primera aproximación es de un nivel exploratorio, debido a la poca investigación sobre el tema objeto de estudio, las limitaciones metodológicas en cuanto al desarrollo de un estándar y la carencia de trabajos planteados para este tipo de industria que consideren la descripción detallada de las metodologías utilizadas y las variables involucradas en ellas. Se basa en una revisión de la literatura, que suministra una visión amplia sobre el estado del arte actual del tema. Tiene en cuenta consideraciones importantes como la huella hídrica verde, que tradicionalmente es subestimada para los análisis en la industria, además, realiza recomendaciones que apuntan al mejoramiento de la gestión del recurso hídrico en diferentes ámbitos. La investigación tiene en cuenta la metodología desarrollada por la Water Footprint Network para la evaluación de la huella hídrica, además del uso de la herramienta de la Global Water Tool para el análisis de estrés hídrico y para la evaluación de impactos la metodología de Conesa Fernández. Pretende establecer un punto de partida para investigaciones futuras que permitan precisar, mejorar e implementar la evaluación de la huella hídrica. En este sentido, se sugieren nuevas investigaciones que permitan precisar la estimación de la huella hídrica gris, la relevancia de la huella hídrica verde y la evaluación de los impactos asociados al uso del agua.

El contenido de este documento se organiza de la siguiente manera, se desarrolla en primer lugar una revisión de la literatura sobre la huella hídrica, sus enfoques, metodologías y evaluación de impactos, seguido de una contextualización de la huella hídrica en Colombia y la industria del cemento. A continuación se realiza el desarrollo metodológico, en el cual se realiza una descripción del área de estudio, las variables a analizar y la metodología empleada. Finalmente, se presentan los resultados, conclusiones y recomendaciones.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Antecedentes de la Huella Hídrica

El concepto de huella hídrica es relativamente nuevo (Hoekstra & Hung, 2002) y tiene como precedentes los conceptos de agua virtual, huella ecológica y huella de carbono. Como principal antecedente del concepto de huella hídrica se encuentra el concepto de agua virtual. Definida como “el volumen de agua requerido para producir un producto o servicio” (Hoekstra & Chapagain, 2007). El término es introducido por J. A. Allan a principios de los noventa (Allan, 1993), al estudiar la posibilidad de importar agua virtual contenida en los productos agrícolas o industriales, en lugar de importar grandes cantidades “reales” de agua, como una solución parcial a los problemas de algunos países del Medio Oriente con escasez de recursos hídricos (Allan, 1998 en Schneider, 2009). De allí la idea de usar la importación de agua virtual contenida en los alimentos como una fuente alternativa de agua para liberar la presión sobre los recursos hídricos escasos (Hoekstra & Chapagain, 2007). Con base en éste concepto, se trató de cuantificar los flujos de agua virtual relacionados con el comercio internacional de alimentos y se desarrolló el concepto de huella hídrica, definida como el volumen total de agua dulce utilizada para producir los bienes y servicios consumidos por los habitantes de una nación, considerando los flujos de comercio de salida y entrada de agua virtual (Chenoweth, Hadjikakou, & Zoumides, 2013).

Por su parte, las huellas ecológica, de carbono e hídrica hacen parte de una “familia de huellas” que sirven para el seguimiento de la presión humana sobre el planeta. Son indicadores que tienen como objetivo medir el impacto generado por el crecimiento de la población y las actividades humanas, ya sea en la biósfera, la atmósfera o la hidrósfera (Galli, Wiedmann, Ercin, Knoblauch, Ewing, & Giljum; 2012). Los diferentes tipos de huella deben ser considerados como indicadores complementarios para cuantificar el uso humano del capital natural (Hoekstra et al., 2011), que sirven para el seguimiento las demandas humanas directas e indirectas, favoreciendo una mayor comprensión de las fuentes de presión antrópicas: la apropiación de los recursos naturales biológicos, las emisiones de Gases de Efecto Invernadero, y el consumo y contaminación de los recursos de agua dulce (Galli et al., 2012). Adicionalmente, son indicadores de sostenibilidad que permiten tomar decisiones a diferentes niveles, tanto en el ámbito de las políticas públicas y empresariales, como en los cambios culturales de las sociedades (González, Montoya, Botero, Arévalo, y Valencia, 2012).

El concepto de huella hídrica se ha desarrollado de manera análoga al de huella ecológica, sin embargo, los orígenes de la huella hídrica se encuentran en estudios del agua mientras la huella ecológica en estudios ambientales (Hoekstra et al., 2011). La huella ecológica es el concepto más antiguo de huella, introducido a principios de los años noventa por Wackernagel y Rees (1996). Es una herramienta diseñada con el objetivo de realizar un seguimiento de las demandas humanas directas e indirectas sobre la capacidad regenerativa de la biósfera o biocapacidad (Galli et al., 2012). Registra ambas demandas para la producción de recursos renovables y la absorción de dióxido de carbono (CO₂) y las compara con los activos ecológicos del planeta (Galli et al., 2012). La huella ecológica “mide el área de tierra biológicamente productiva y el agua necesaria para proporcionar los recursos renovables que la gente utiliza, e incluye el espacio necesario para infraestructuras y la vegetación para absorber el dióxido de carbono (CO₂)” (WWF, 2010). En comparación con la huella hídrica, mientras que la huella ecológica calcula “el área total de espacio productivo requerido para producir los productos y servicios consumidos por una determinada población, la huella hídrica calcula el volumen de agua necesario para producir

los mismos bienes y servicios” (Schneider, 2009). En este sentido, la huella ecológica considera las presiones antropogénicas que son generalmente evaluadas de forma independiente, como las emisiones de CO₂ o el cambio del uso del suelo, sin embargo, contabiliza la huella de carbono más no la de agua, puesto que no considera el consumo de agua dulce.

Asimismo, el concepto de huella ecológica sirvió de base para la introducción del concepto de huella de carbono. La cual se define como la cantidad total de emisiones de gases de efecto invernadero causados directa o indirectamente por una actividad o a través del ciclo de vida de un producto (Hoekstra et al., 2011). Es expresada en términos equivalentes de CO₂, debido a que dentro de las emisiones que afectan la huella de carbono, es el que mayor efecto tiene en la atmósfera por su magnitud y permanencia. De manera análoga, la huella de carbono tiene relación estrecha con el concepto de huella hídrica, puesto que a partir de la generalización y aceptación de su cálculo, se da un paso más allá intentando extrapolar el mismo concepto en el ámbito del agua, razón por la cual se ubica como un importante antecedente de la huella hídrica. Ambos conceptos son complementarios en la medida que abordan problemáticas ambientales diferentes: el cambio climático, en el caso de la huella de carbono y la escasez de agua dulce, en el de la huella hídrica. Si bien, hay similitudes en la forma como se definen y calculan, difieren en aspectos importantes en lo referente al lugar y el momento en el que ocurren, elementos críticos en el caso de la huella hídrica pero irrelevantes para la huella de carbono (Ercin & Hoekstra, 2012).

La primera evaluación de huella hídrica nacional se llevó a cabo por Hoekstra y Hung (2002), luego, se realizó una evaluación más amplia por Hoekstra y Chapagain (2007, 2008) y una tercera evaluación aún más detallada, por Hoekstra y Mekonnen (2012). La huella hídrica comenzó a ganar interés alrededor de 2008, año en el que fue establecida la Water Footprint Network (WFN), el organismo pionero en el desarrollo y aplicación del concepto de huella hídrica y el responsable del establecimiento de la metodología de evaluación de huella hídrica, ampliamente utilizada en todo el mundo. La WFN publicó en 2009, la primera versión del estándar global para la evaluación de la huella hídrica (Hoekstra, 2009) y dos años después la segunda versión (Hoekstra et al., 2011). El estándar contiene definiciones de la huella hídrica de un proceso, producto, consumidor y productor, asimismo, de un área geográficamente delimitada. Además, contiene la metodología de cálculo de la huella hídrica para los procesos y productos, así como para los consumidores, las naciones y las empresas. También incluye métodos para la evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica y la formulación de respuestas. Como era de esperar, las definiciones y los métodos han sido cuestionados (Wichelns, 2011 en Ercin & Hoekstra, 2012), sin embargo, no se ha desarrollado un marco metodológico alternativo que se establezca como estándar. Recientemente, se está desarrollando por parte de la Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas inglés) un estándar para el procedimiento de la huella hídrica, que espera establecerse como el principal referente internacional para evaluaciones e informaciones de huellas hídricas.

Como la definición y puesta en práctica del concepto de huella hídrica es nuevo: se introdujo en el campo académico desde el 2002 y fue hasta el año 2008 que entró en el campo de las empresas, el gobierno y la sociedad civil; la experiencia sobre el concepto en la práctica es limitada y se carece de un número significativo de estudios de evaluaciones completas de huella hídrica (Hoekstra et al., 2011). A nivel global, la gran parte de estudios se han desarrollado principalmente en el sector agrícola, para diferentes escalas espaciales, en países como China, India, España, Reino Unido, Holanda, Alemania, Túnez, Indonesia, entre otros. Cabe anotar que España es el primer país en incluir el análisis de la huella hídrica en la formulación de políticas gubernamentales en el contexto de la Directiva Marco

del Agua de la Unión Europea, seguido por Alemania que empezó a utilizar estimaciones de huellas hídricas en los documentos de política desde 2012. Para el caso de Colombia, el primer estudio nacional de huella hídrica fue realizado en el 2012 y liderado por el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF por sus siglas en inglés) Colombia, “Una mirada a la agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica” (Arévalo, 2012) donde estimaron la huella hídrica para los diez principales cultivos, basado en la investigación denominada “Estudio nacional de Huella Hídrica Colombia sector agrícola” (Arévalo, Lozano y Sabogal, 2011). A nivel empresarial, se encuentra el proyecto SuizAgua Colombia que consiste en una alianza público-privada para la medición, reducción y divulgación de la huella hídrica; la fase I del proyecto que fue recientemente publicada se enfocó en la evaluación de la huella hídrica de cuatro empresas suizas que operan en Colombia: Clariant, Nestlé, Syngenta y Holcim. En relación con la industria cementera, recientemente, empresas como Holcim y Cemex, han incorporado en sus informes de sostenibilidad la evaluación de la huella hídrica.

2.2. El concepto de Huella Hídrica

Como se mostró, el concepto de huella hídrica, también denominada huella hidrológica o huella de agua, tiene sus orígenes en la necesidad de encontrar los vínculos ocultos entre el consumo humano y el uso del agua y entre el comercio mundial y la gestión de los recursos hídricos (Hoekstra & Chapagain, 2007). Fue introducido por Hoekstra y Hung (2002) con el objetivo de desarrollar un indicador basado en el consumo del uso de agua dulce. Se define como el “volumen total de agua dulce consumida directamente e indirectamente por una nación o una empresa, o en la provisión de un producto o servicio” (Hoekstra & Chapagain, 2007). La huella hídrica es, en general, “un indicador de la apropiación de agua dulce, medido en términos de los volúmenes de agua consumida (evaporada o incorporada a un producto) y contaminada por unidad de tiempo” (Ercin & Hoekstra, 2012). Es un indicador multidimensional, que mide los volúmenes de consumo hídrico por fuente de suministro, así como el volumen de agua contaminada por tipo de contaminación, sus componentes pueden ser especificados a nivel geográfico y temporal (Hoekstra et al., 2011). Por lo tanto, el uso del concepto proporciona información adicional en comparación con los indicadores tradicionales, puesto que vincula el consumo humano en el espacio y tiempo de producción, contabiliza el uso del agua en todas las etapas de la cadena de suministro de un producto y es un medio útil para la estimación de los flujos de agua a través del comercio de productos y materias primas (Chenoweth et al., 2013).

La huella hídrica representa un lenguaje común para expresar el uso del agua desde las perspectivas de la producción y el consumo en diferentes contextos (UNEP & KOICA, 2010). Se encuentra definida más específicamente para un proceso o producto, y para cualquier grupo definido de consumidores o productores (organización pública, empresa privada, sector económico). Desde la perspectiva del productor y el consumidor, la huella hídrica es un indicador del uso tanto directo como indirecto del agua (Hoekstra & Chapagain, 2007). De un lado, es posible hablar, de la huella hídrica de un producto, que es el volumen de agua utilizada directa (en operaciones propias) o indirectamente (en la cadena de suministro) para producir el producto (Hoekstra et al., 2011). La información proporcionada puede ser utilizada por las empresas para llevar a cabo la evaluación de riesgos, como herramienta de planificación, como mecanismo para identificar los *hotspots* en sus cadenas de suministro o junto a herramientas como la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con el fin de realizar un benchmarking de productos (UNEP & KOICA, 2010).

Por otra parte, se puede hablar de la huella hídrica de un individuo o conjunto de individuos (persona, familia, pueblo, ciudad, provincia, estado, país), que se refiere a la cantidad total

de agua dulce usada para producir los bienes y servicios directos e indirectos consumidos por un individuo o un grupo de individuos (UNEP & KOICA, 2010). En este caso la información de la huella hídrica puede ser utilizada por los gobiernos, el mundo académico, las ONG u otras organizaciones para la sensibilización o para la comprensión de los cambios y tendencias en los patrones de consumo en relación con los recursos hídricos. Además, puede ser utilizada para la gestión del agua, comparando las huellas hídricas que consumen y contaminan los sectores de la producción en una determinada área geográfica con la disponibilidad de agua en ésta área (UNEP & KOICA, 2010).

2.3. Los colores del agua

Debido a los diferentes impactos ambientales y los costos de oportunidad de las diversas formas de uso del agua, la huella hídrica total a nivel nacional o del producto se divide en sub-categorías de agua azul, verde y gris (Hoekstra et al., 2011).

La huella hídrica azul se refiere al consumo de agua superficial y subterránea. El consumo se refiere a la extracción o pérdida de agua disponible en un depósito superficial en la zona de captación (Civit, Arena, Curadelli, & Piastrellini, 2012). Las pérdidas se producen cuando el agua se evapora, se incorpora a un producto, vuelve a otra área de influencia o al mar, o no vuelve en el mismo periodo de tiempo. En la medida en que ocurren estas pérdidas se define como un indicador del uso consuntivo del agua (Hoekstra et al., 2011). La huella hídrica azul es el volumen de agua dulce extraído de los cuerpos de agua, que es consumido y que no retorna (Schneider, 2009), “responde a un déficit en la disponibilidad de agua procedente de la lluvia. El agua azul contiene conceptos implícitos de escasez y competencia por el recurso hídrico” (Arévalo, 2012). Una definición amplia de huella hídrica azul incluye toda el agua de riego y el uso directo del agua en la industria o en los hogares, menos los flujos de retorno, por lo tanto, se diferencia de la medida tradicional de “extracción de agua” en lo relacionado con los posibles flujos de retorno, es decir, el volumen de agua que retorna al cuerpo de agua (Chenoweth et al., 2013).

Por su parte, la huella hídrica verde “se refiere a la precipitación sobre la tierra que no provoque escorrentía o se sume a las aguas subterráneas, pero que se mantenga en el suelo, su superficie o la vegetación. Con el tiempo, esta parte de la precipitación se evapora o transpira a través de las plantas” (Hoekstra et al., 2011). Representa el agua de lluvia consumida directamente por la vegetación o los cultivos a través de la evapotranspiración de la humedad almacenada en el suelo, también conocida como precipitación efectiva o productiva (Mekonnen y Hoekstra, 2011a, en Chenoweth et al., 2013). Esto es considerado con frecuencia como el componente de secano de la huella hídrica (Chenoweth et al., 2013).

Por último, la huella hídrica gris se define como el volumen de agua contaminada como resultado de los procesos de producción. Es un indicador “de la cantidad de agua dulce necesaria para asimilar la carga de contaminantes dadas las concentraciones naturales conocidas de éstos y los estándares locales de calidad del agua vigentes” (Arévalo, 2012). Por lo tanto, la huella hídrica gris “es una medida estimada del potencial deterioro de la calidad de las aguas causada por la producción de un determinado bien o servicio” (Chenoweth et al., 2013).

Cuando se tienen en cuenta los tres componentes del agua, la huella hídrica pretende abarcar todos los tipos de consumo directos e indirectos del uso del agua (agua azul y verde) y la asimilación de la contaminación (a través de la estimación del agua gris). Al considerarla de este modo proporciona más información que una huella que consiste en un solo número (Chenoweth et al., 2013). Es importante la distinción entre las huellas azul y verde debido a que “los impactos hidrológicos, ambientales y sociales, así como los costos

de oportunidad económica de la superficie y el uso de aguas subterráneas para la producción difieren claramente de los impactos y los costes del uso de agua de lluvia” (Falkenmark y Rockström, 2004; Hoekstra y Chapagain, 2008; en Hoekstra et al., 2011). Además, el hecho de expresar la huella hídrica gris en términos de volumen de contaminación, significa que puede ser comparada con el consumo de agua, también expresado como un volumen (Hoekstra et al., 2011).

No obstante, se ha cuestionado la validez científica de descomponer la huella hídrica en sus tres componentes, con el argumento de que “el agua azul y verde no son necesariamente categorías discretas, mientras que el agua gris es esencialmente una medida ficticia de la contaminación del agua que no refleja bien un uso consuntivo de los costos de tratamiento del agua o la contaminación” (Gawel and Bernsen, 2011b, en Chenoweth et al., 2013). Además, que la consideración de la huella hídrica verde crea inconsistencias entre los datos de los productos agrícolas y los no agrícolas (Zhang et al., 2011 en Chenoweth et al., 2013). Respecto a la huella hídrica gris, argumentan que es un teórico más que un volumen real medido, por lo que se le considera el menos significativo de los tres tipos de agua. Sumado al hecho de que se carece de un método estandarizado para la cuantificación de los volúmenes de dilución necesarias para la asimilación, el agua gris se convierte en un cálculo muy subjetivo (Chenoweth et al., 2013). A pesar de ello, hacer la distinción entre los tipos de agua es importante, debido a que poseen diferentes características, bien sea en términos de sus costes de oportunidad e impacto hidrológico y medioambiental, como en las políticas que pueden gestionar (Rodríguez, 2008 en Brito, 2011).

3. EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA

El presente estudio se basa en la metodología desarrollada por Hoekstra et al. (2011) para la evaluación de la huella hídrica. Según los autores, la evaluación de la huella hídrica es una herramienta de análisis, que sirve para “comprender cómo las actividades y productos se relacionan con la escasez de agua, su contaminación, los impactos asociados y qué se puede hacer para asegurar que las actividades y productos no contribuyan a un uso insostenible del agua dulce”. Esta metodología considera que una evaluación completa de la huella hídrica está compuesta por cuatro fases: definición de los objetivos y alcance, contabilidad de la huella hídrica, evaluación de la sostenibilidad y formulación de respuestas. Con el fin de abordar el tema del presente trabajo, se pondrá el foco en la evaluación de la huella hídrica de procesos. Para una revisión más amplia se recomienda revisar el manual (Hoekstra et al., 2011).

3.1. Definición de los objetivos y el alcance

Es importante comenzar por establecer claramente los objetivos y el alcance del estudio, debido a que la evaluación de la huella hídrica se puede aplicar para propósitos muy variados y en diferentes contextos. Entre los objetivos que pueden motivar un estudio de la huella hídrica están la sensibilización, la identificación de una problemática, la formulación de políticas o la fijación de metas cuantitativas para la reducción de la huella. En esta etapa se deben determinar la profundidad y el detalle del análisis, el periodo de tiempo, la escala de análisis, el alcance del estudio (huella hídrica directa o indirecta), los tipos de huella (azul, verde o gris) o si centrarse en una fase particular (contabilidad, evaluación de la sostenibilidad o formulación de respuesta), entre otros aspectos que dependen de la finalidad del estudio. Para el caso de este trabajo, la huella hídrica de un proceso, Hoekstra et al. (2011) proponen plantearse preguntas tales como: “¿Qué proceso se debe

considerar?, ¿Un proceso específico, o procesos alternativos, sustituibles (a fin de comparar las huellas hídricas de técnicas alternativas)?. ¿A qué escala?, ¿Un proceso específico en un lugar específico, o el mismo proceso en diferentes lugares?” (Hoekstra et al., 2011); con el fin de definir el objetivo de la evaluación de la huella hídrica para un proceso.

3.2. Contabilidad de la huella hídrica

De acuerdo con las consideraciones de la fase anterior, se recogen los datos y se elabora la contabilidad en función del alcance y el nivel de detalle. Hoekstra et al. (2009) recomiendan plantearse como mínimo las siguientes preguntas:

- ¿Considerar huella hídrica azul, verde y gris?
- ¿Cuándo truncar el análisis dentro de la cadena de suministro?
- ¿Qué nivel de aclaración espacio-temporal?
- ¿Qué periodo de datos?
- Para los consumidores y las empresas: ¿considerar la huella hídrica directa e indirecta?
- Para las naciones: ¿considerar la huella hídrica del país o la huella hídrica del consumo nacional?, ¿considerar la huella hídrica interna y externa del consumo nacional?

En relación con ésta fase, los mismos autores establecieron algunas consideraciones para mantener la coherencia entre los diferentes tipos de contabilidad de la huella hídrica:

- La huella hídrica de un proceso o etapa (etapa o fase del proceso) es el elemento básico para calcular la huella hídrica.
- La huella hídrica de un producto (bien o servicio) es la suma de las huellas hídricas de los distintos procesos necesarios para producir un determinado producto, considerando toda la producción y la cadena de suministro.
- La huella hídrica de un consumidor individual es la suma de las huellas hídricas de todos los productos consumidos por tal consumidor.
- La huella hídrica de una comunidad o conjunto de consumidores (por ejemplo los habitantes de un municipio, provincia o nación) es la suma de las huellas hídricas individuales de todos sus miembros.
- La huella hídrica de una empresa o de un productor es la suma de las huellas hídricas de los productos finales o transformados que produce la empresa o el productor.
- La huella hídrica de un área geográficamente delimitada (tal como un municipio, provincia, país, cuenca hidrográfica o zona de captación) es la suma de las huellas hídricas de todos los procesos que tienen lugar en esa zona.
- La huella hídrica total de la humanidad es la suma de las huellas hídricas de todos los consumidores del mundo, o lo que es lo mismo, es igual a la suma de las huellas hídricas de todos los bienes y servicios de consumo finales que se consumen anualmente. También es igual a la suma de toda el agua consumida o contaminada en los procesos a nivel mundial.

Con el fin de evitar la doble contabilidad de la huella hídrica de un producto final, se asigna siempre la huella hídrica del proceso al producto final, o en el caso de procesos que generan diferentes productos finales, la huella hídrica de ese proceso se divide entre los productos finales. No se deben agregar las huellas hídricas de los productos intermedios, porque se caería fácilmente en una doble contabilidad. En este sentido, es posible agregar las huellas

hídricas de los consumidores individuales sin caer en una doble contabilidad, sin embargo, no hay que añadir las huellas hídricas de los diferentes productores (Hoekstra et al., 2011). Para el desarrollo del presente trabajo se describe la huella hídrica de procesos en la sección correspondiente a la metodología.

3.3. Evaluación de la sostenibilidad

Como el interés de este trabajo es la huella hídrica de un proceso, según Hoekstra et al. (2011) la sostenibilidad de esta huella depende de dos criterios que deben ser evaluados por separado para las huellas azul, verde y gris. El primer criterio es el contexto geográfico, que implica que cuando la huella hídrica de un proceso está situada en un *hotspot*, donde la huella hídrica global no es sostenible (desde cualquier punto de vista ambiental, social o económico), la huella hídrica de este proceso en particular es insostenible. En este sentido, “mientras la huella hídrica total de una cuenca en un período determinado sea insostenible, cada contribución específica debe ser considerada como no sostenible, a pesar de que su contribución pueda ser relativamente pequeña” (Hoekstra et al., 2011).

El segundo criterio se refiere a las características del proceso en sí, implica que cuando la huella hídrica de un proceso pueda reducirse o evitarse por completo, a un costo social aceptable, la huella hídrica del proceso es insostenible en sí misma, independientemente del contexto geográfico (Hoekstra et al., 2011). En éste criterio, resulta fundamental una macro-perspectiva, que considere las externalidades económicas y ambientales que resultan de la sobreexplotación y contaminación de los recursos hídricos, con el fin de que dicha reducción de la huella hídrica se traduzca en un beneficio para la sociedad o en asumir un costo razonable que no dé lugar a un consumo innecesario de agua o a la disminución de la capacidad de asimilación de residuos. No obstante, no existen criterios claros para determinar si un proceso es insostenible en sí mismo, por lo que se hace necesario recurrir al juicio de expertos y a las técnicas existentes. De ahí la importancia de generar puntos de referencia mundial que sirvan para comparar huellas hídricas razonables de un proceso específico (Hoekstra et al., 2011).

3.4. Formulación de respuestas

Esta etapa busca dar solución a las problemáticas del impacto de la huella hídrica evaluada, por medio de la formulación de estrategias y políticas. Se plantea la reducción o compensación de la huella hídrica y se define por quién será llevada a cabo su implementación: gobiernos, consumidores, empresas, agricultores, inversores o mediante la cooperación intergubernamental (Hoekstra et al., 2011). Esta etapa final, tiene por objetivo dar respuesta a los problemas que se presenten con relación al consumo excesivo de agua, la contaminación de afluentes cercanos, el uso ineficiente del recurso hídrico y demás aspectos que afecten la racionalización de la huella hídrica total de la humanidad. Para una revisión del inventario de opciones para la formulación de respuestas se recomienda ampliar el propuesto por Hoekstra et al. (2011).

4. ENFOQUES Y METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA HÍDRICA

De acuerdo con Chenoweth et al. (2013) existen diferentes metodologías empleadas en la actualidad para el cálculo de la huella hídrica, que se emplean en diferentes sectores y escalas espacio-temporales y enfatizan en diferentes aspectos relacionados con el agua. No obstante, se carece de alguna que se establezca como estándar. En efecto, la variedad de enfoques de huella hídrica utilizados no es ajena a la industria del cemento, a pesar de ello, diferentes empresas del sector como Holcim, Lafarge y Cemex han considerado la

huella hídrica en sus informes anuales de sostenibilidad, con el fin de mitigar los impactos sobre los recursos hídricos, empleando diferentes metodologías para el cálculo de la huella hídrica, que en oportunidades varían año tras año. Dada la demanda creciente para evaluarla e informarla, se hace necesario disponer de métodos adecuados que se puedan utilizar de forma coherente en su evaluación a nivel global y en la presentación de informes sobre huella hídrica, para una mejor comprensión de los resultados y compatibilidad en los análisis a la hora de hacer comparaciones.

Se encuentran dos grupos de enfoques para el cálculo de las huellas hídricas, relacionados con el alcance global del análisis: enfoques de abajo hacia arriba y enfoques de arriba hacia abajo.

4.1. Enfoques de abajo hacia arriba

Los enfoques de abajo hacia arriba consideran como sus elementos básicos los procesos de producción individuales (Mihăiescu, Mihăiescu, & Odagiu, 2012). El enfoque es genérico y puede ser utilizado para el cálculo de todo tipo de cuentas desde la huella hídrica de un producto o consumidor, como para empresas, sectores, países y regiones (Ercin & Hoekstra, 2012). Mediante éste enfoque la huella hídrica suma el agua utilizada para producir toda la gama de bienes y servicios consumidos en un país, mediante la suma de las necesidades directas de agua en todas las etapas de la cadena de suministro para cada producto. Cuando los productos primarios son procesados en más de un producto, la huella hídrica se aplica según productos y fracciones de valor de los productos derivados, con el fin de garantizar que no haya doble contabilidad de las huellas hídricas (Feng et al., 2011 en Chenoweth et al., 2013). De manera amplia, existen dos tipos de enfoques de abajo hacia arriba: el Análisis del Ciclo de Vida y el enfoque de flujos de agua virtual.

Un primer enfoque de abajo hacia arriba es el ACV, una herramienta metodológica originada en el campo de la ecología industrial, que sirve para evaluar el impacto ambiental de un producto, proceso o sistema a lo largo de todo su ciclo de vida, desde que se obtienen las materias primas hasta su fin de vida (Chenoweth et al., 2013). “Se basa en la recopilación y análisis de las entradas y salidas del sistema para obtener unos resultados que muestren sus impactos ambientales potenciales, con el objetivo de poder determinar estrategias para la reducción de los mismos” (Ihobe, 2009). Esta herramienta permite medir el agua utilizada en cada etapa de la cadena de suministro, según lo establecido por parte de la ISO, organización encargada de brindar el marco para la estandarización de la metodología de ACV, según la familia de normas ISO 14.040, referidas a principios, marco de referencia, requisitos y directrices del ACV.

Una evaluación del ciclo de vida (ECV) es una “recopilación y evaluación de las entradas, salidas y los potenciales impactos ambientales relacionados con el agua utilizada o afectada por un producto, proceso u organización” (ISO, 2014). Una huella hídrica es la fracción de esos impactos que están relacionados con el agua. Incluyen los impactos asociados con el uso, disponibilidad del recurso para los seres humanos y los ecosistemas, así como los impactos directos sobre el agua y sus usuarios (WULCA, n.d.). En la evaluación se incluyen únicamente las emisiones al aire y el suelo que impactan la calidad del agua (ISO, 2014). Los resultados se cuantifican utilizando las categorías de impacto del ACV (por ejemplo eutroficación del agua, acidificación del agua, toxicidad humana -debido a la contaminación del agua-, ecotoxicidad del agua, entre otros).

El segundo enfoque de abajo hacia arriba es el de flujos de agua virtual, el cual estima la huella hídrica mediante el cálculo del contenido de agua virtual de los productos y los datos

del comercio internacional. Este enfoque se basa en los datos de entrada y los flujos de agua virtual. En la mayoría de estudios de éste tipo, los flujos de agua virtual se concentran en los países exportadores inmediatos, aunque recientemente hay algunos estudios de huella hídrica nacional que trazan la cadena de suministro más allá de los países exportadores inmediatos para el origen de la producción (Mihăiescu et al., 2012).

Resumiendo, los enfoques de abajo hacia arriba para el seguimiento del uso del agua proporcionan análisis detallado basado en procesos y se pueden utilizar fácilmente para las necesidades de un estudio sobre productos específicos. “Al calcular la huella hídrica de productos con el enfoque de abajo hacia arriba, la contabilidad sobre las cadenas de suministro se realiza en la misma forma que en un Inventario del Ciclo de Vida en estudios de ACV” (Ercin & Hoekstra, 2012). La ventaja principal del enfoque de abajo hacia arriba es su precisión, sin embargo, requieren de una gran cantidad de información para su realización y depende de la calidad de los datos de consumo, tal sería el caso de la estimación de la huella hídrica nacional para la que se necesitan datos de miles de productos (Mihăiescu et al., 2012). Otra desventaja, es el inevitable error de truncamiento, por lo general trazando el consumo de agua sólo para un cierto nivel, particularmente en lo que respecta a las importaciones (Mihăiescu et al., 2012).

4.2. Enfoques de arriba hacia abajo

El enfoque de arriba hacia abajo consiste en tomar el uso total de los recursos hídricos en el área bajo consideración y añadir las importaciones brutas de agua virtual en el área y restar las exportaciones brutas de agua virtual (Ercin & Hoekstra, 2012). La importación de agua virtual es el volumen de agua que se utiliza en otros países para producir los bienes y servicios que son importados y consumidos al interior del área considerada. La exportación de agua virtual es el volumen de agua utilizada en el país para la fabricación de los productos de exportación que se consumen en otro lugar (Hoekstra & Chapagain, 2007). Este enfoque no requiere datos de consumo, sin embargo, requiere datos sobre el uso del agua por sectores, transacciones monetarias intersectoriales y comercio entre los países o regiones (Chenoweth et al., 2013), por lo que es vulnerable a la calidad de los datos.

De acuerdo con Mihăiescu et al. (2012) un enfoque de arriba hacia abajo que ofrece importantes características de la huella hídrica es el análisis insumo-producto medioambiental (Environmentally Input-Output Analysis, EIOA, por sus siglas en inglés). En primer lugar, porque proporciona una descripción completa de la cadena de suministro nacional e internacional y evita el error de truncamiento que se encuentra generalmente en los enfoques de abajo hacia arriba. En segundo lugar, se basa en el consumo final en lugar del consumo aparente y asegura que el agua utilizada en la producción se asigna al consumo del producto final y su ubicación. Tercero, porque las variantes del modelo multi-regional también proporcionan un marco metodológico para abordar de manera global los vínculos de comercio internacional entre países y sectores. Estos modelos proporcionan una descripción de toda la cadena de suministro global y son capaces de rastrear el agua a través de cualquier nivel de la cadena de suministro. Por último, son particularmente útiles cuando queremos mirar los requerimientos directos e indirectos de agua de consumo final de una nación, una región o una casa. Esto es porque el patrón de consumo final se compone de tantos bienes y servicios diferentes que los enfoques de abajo hacia arriba tienen problemas en proveer todas las descripciones basadas en los procesos necesarias, de la producción y el consumo de agua en sus cadenas de suministro (Mihăiescu et al., 2012).

Siguiendo a los mismos autores, se encuentran dos limitaciones del enfoque de huella hídrica insumo-producto medioambiental. La primera está relacionada con la agregación general a nivel de sectores económicos en vez de productos individuales, en especial para el sector agrícola que es de gran interés para el análisis de la huella hídrica. La segunda limitación tiene que ver con el supuesto de tecnología doméstica, que considera que la tecnología foránea se produce con la misma combinación de tecnología de la producción nacional, debido a que los datos sobre las interrelaciones entre las distintas regiones o países son limitados (Mihăiescu et al., 2012).

Concluyendo, los enfoques de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo tienen sus ventajas e inconvenientes. El enfoque de abajo hacia arriba es el más utilizado debido a su relativa simplicidad, proporciona una información más intuitiva de los productos básicos y goza de un incremento del nivel de estabilidad debido, principalmente, a una mayor disponibilidad de los datos necesarios (van Oel et al., 2009 en Chenoweth, 2013). Basado en procesos, el enfoque de abajo hacia arriba capta mejor el uso directo de agua de productos agrícolas específicos, mientras que el enfoque de arriba hacia abajo, al basarse en datos altamente agregados de uso de agua sectorial, capta las cadenas de suministro enteras y puede producir una mejor huella hídrica detallada de los productos industriales (Feng et al., 2011 en Chenoweth, 2013). Los dos enfoques dan resultados significativamente diferentes debido a los diferentes métodos de cálculo, así como en las definiciones adoptadas en relación con los orígenes sectoriales de los productos finales.

4.3. Métodos y herramientas para medir el uso del agua y sus impactos

Las metodologías, enfoques e indicadores para evaluar los impactos del uso de agua dulce están aún en proceso de evolución. “El desarrollo del concepto de huella hídrica ha sido un paso importante en esta dirección, sin embargo las metodologías existentes evalúan principalmente la cantidad de agua que se utiliza en lugar de los impactos relacionados” (Jeswani & Azapagic, 2011). En la actualidad existen una variedad de métodos para medir los impactos del uso del agua basados en la familia de enfoques de abajo hacia arriba y la metodología propuesta por la WFN, algunos estudios elaboran ésta última y omiten o añaden ciertos elementos con el fin de mejorar su potencial como indicador de impacto. Otros estudios reconocen la importancia de considerar los fundamentos del ACV debido a que es una metodología que proporciona una buena base para la cuantificación de los impactos.

4.3.1. Metodología de la Huella hídrica de la WFN

El concepto de huella hídrica desarrollado por la WFN y liderado por Hoekstra se ha centrado hasta el momento en la cuantificación del agua utilizada. A pesar de que el enfoque de la huella hídrica profundiza en la naturaleza del uso del agua para la identificación y caracterización de los riesgos, proporciona un método poco desarrollado para evaluar los impactos, sus precursores argumentan que un índice agregado no es la intención del enfoque (Hoekstra et al., 2009). Si bien la huella hídrica en términos de volumen es útil desde la perspectiva de la gestión de los recursos hídricos y la cuantificación del uso de agua, no refleja los potenciales impactos ambientales del uso del agua, debido, por ejemplo, a la escasez de agua (Jeswani & Azapagic, 2011). La huella hídrica como metodología para estimar los usos del agua se puede revisar en la sección 3.

La “evaluación del impacto” en la metodología de la huella hídrica propuesta por la WFN se conoce como “evaluación de la sostenibilidad”. El primer término se dejó de emplear debido a que el concepto "evaluación de la sostenibilidad" refleja mejor lo que se pretende abarcar (Hoekstra et al., 2011). La metodología desarrollada por la WFN realiza la evaluación de la

sostenibilidad de la huella hídrica mediante la consideración de los impactos sobre el uso de los recursos hídricos y la calidad del agua que afectan la condición de una cuenca hidrográfica y sus usuarios. Si bien el volumen de apropiación de agua dulce es un elemento clave, los impactos ambientales locales relacionados con tal apropiación resultan relevantes para el análisis de la sostenibilidad. “Este impacto ambiental local depende de la escasez y el nivel de contaminación del agua en las cuencas en que se encuentra la huella hídrica” (Hoekstra et al., 2011). Razón por la cual la evaluación de la sostenibilidad se debe llevar a cabo mediante la evaluación de las dimensiones ambiental, social y económica, pilares que se ajustan al propósito de la huella hídrica como una herramienta destinada a facilitar el uso eficiente, equitativo y sostenible de los recursos hídricos (UNEP & KOICA, 2010).

Para Hoekstra et al., (2011) la primera dimensión, la sostenibilidad ambiental, está definida para una cuenca, puesto que relaciona la disponibilidad del recurso hídrico en un área y la extiende a los diferentes elementos a considerar. Cuando la huella hídrica es ambientalmente insostenible se crea un *hotspot* medioambiental, es decir, el período de tiempo en el cual se incumplen las necesidades de agua azul y verde o los estándares de calidad del agua en un zona determinada. Con el fin de medir la gravedad del *hotspot*, se evalúan los indicadores de escasez de agua verde y azul y el nivel de contaminación de aguas. Los indicadores de escasez del agua azul y verde se calculan como el cociente entre el total de las huellas hídricas en la zona de captación y la disponibilidad real de agua en la cuenca, para cada tipo de agua. Cuando los valores de éstos indicadores superan el cien por ciento, indican que las huellas hídricas azul o verde no son sostenibles ambientalmente (Hoekstra et al., 2011). Por su parte, el indicador del nivel de contaminación del agua, se calcula como la proporción de la huella hídrica gris total sobre la escorrentía. Cuando el indicador supera el cien por ciento, las normas de calidad ambiental del agua son sobrepasadas y significa que la huella hídrica gris es insostenible ambientalmente (Hoekstra et al., 2011).

En segundo lugar, se considera la sostenibilidad social. Se puede decir que la huella hídrica total de una cuenca es socialmente insostenible y por lo tanto se crea un *hotspot* social “cuando las necesidades humanas básicas no son satisfechas para todas las personas en la zona o cuando no se cumplen las reglas básicas de igualdad, siempre y cuando la huella hídrica de la cuenca se pueda establecer que esté parcialmente relacionada con ello” (Hoekstra et al., 2011). La dimensión social de la huella hídrica puede acarrear criterios difíciles de cuantificar y delimitar como lo son las necesidades humanas básicas y las reglas de justicia, elementos que requieren del juicio y consideraciones de expertos.

Por último, la sostenibilidad económica ocurre cuando el agua se asigna o se utiliza de una forma económicamente eficiente. Es decir, una huella hídrica es insostenible desde el punto de vista económico, cuando sus beneficios no compensan el costo total asociado a esta, incluidas externalidades, costos de oportunidad y otras rentas de escasez de agua (Hoekstra et al., 2011). Por tanto, “el agua en una cuenca debe ser asignada en forma económicamente eficiente a los diferentes usuarios (eficiencia de asignación) y cada usuario debe utilizar su agua asignada de manera eficiente (eficiencia productiva)” (Hoekstra et al., 2011).

Como se puede ver, los *hotspots* dan a conocer las zonas de captación y los períodos en los que hay escasez o contaminación de aguas durante el año, y su efecto en la sostenibilidad del agua basado en las dimensiones ambientales, sociales y económicas (Hoekstra et al., 2011). Tras identificar estos *hotspots* y determinar su gravedad, se puede realizar la evaluación de los impactos primarios y secundarios para cada uno de ellos.

Los impactos primarios se describen en términos de cambios de flujos de agua y calidad (en comparación con las condiciones naturales, sin intervenciones humanas). Uno muestra, por ejemplo, cómo la escorrentía en una cuenca ha disminuido por la huella hídrica humana azul en la cuenca y en qué medida esto entra en conflicto con los requisitos de los caudales ambientales. Otro describe en detalle cómo ha cambiado la calidad del agua con respecto a las condiciones naturales, por ejemplo por los parámetros de calidad del agua, y cuáles parámetros violan las normas ambientales de calidad del agua. (Hoekstra et al., 2011)

“Los impactos secundarios de las huellas hídricas verde, azul y gris, son los bienes y servicios ecológicos, sociales y económicos que se ven afectados en una zona de captación como resultado de los impactos primarios” (Hoekstra et al., 2011). Es un campo donde hay literatura disponible, a pesar de que la estructuración de una evaluación de impacto ambiental, social o económica siga siendo un reto importante. “Los impactos secundarios se pueden medir por ejemplo en términos de especies desaparecidas, pérdida de biodiversidad, reducción de la seguridad alimentaria, efectos en la salud humana, reducción de los ingresos por actividades económicas que dependen del agua, entre otros” (Hoekstra et al., 2011)

En conclusión, los factores que influyen en la sostenibilidad de una huella hídrica son, de un lado, el tamaño, la ubicación y el color de la huella hídrica; y de otro, el contexto en el que se encuentra, es decir, las condiciones locales, así como el contexto más amplio en el que ocurre, puesto que “una huella hídrica que es sostenible a nivel local también debe serlo en un contexto global, porque la sostenibilidad es un asunto universal” (UNEP & KOICA, 2010). De acuerdo con estas consideraciones, los impactos de una huella hídrica localizada deben ser analizados siempre dependiendo de las huellas hídricas agregadas de todas las actividades dentro de un área geográfica determinada, es decir, a nivel micro (local), meso (cuencas hidrográficas) y macro (más allá de la cuenca del río)– (UNEP & KOICA, 2010). La metodología desarrollada por la WFN ayuda a identificar los *hotspots* que vinculan el uso del agua con sus fuentes, mediante la consideración de las aguas azules, verdes y grises se logra dar luces sobre la naturaleza de los riesgos y el tipo de impactos, lo anterior, ilustra una medida general que no trata de cuantificar los impactos relacionados con el agua.

En este orden de ideas, cabe resaltar que el proceso de comprensión y cuantificación de los impactos relacionados con el agua es bastante complejo, debido en gran medida a la variedad de criterios que pueden comprender el contexto de los recursos hídricos locales y la dificultad en la cuantificación de algunos de ellos, en particular en lo relacionado con los aspectos sociales (UNEP & KOICA, 2010). Aunque, la distinción por colores de la huella hídrica proporciona información importante sobre el contexto en el que se utiliza un determinado volumen de agua y puede ayudar a una mejor comprensión de los impactos, la huella hídrica definida así ilustra una medida general y no considera la gama completa de los impactos relacionados con el agua (UNEP & KOICA, 2010). Por lo tanto, el marco general propuesto por la WFN ofrece una imagen de la aplicación de la metodología de la huella hídrica para diferentes propósitos, sin embargo, se precisa de la generación de directrices más concretas y prácticas para su aplicación en la evaluación de impactos.

4.3.2. Enfoques independientes para la estimación de los impactos del uso del agua basados en la huella hídrica de la WFN

De acuerdo con UNEP y KOICA (2010) hay una variedad de estudios de ACV que se han publicado recientemente intentando utilizar las medidas volumétricas proporcionadas por

la huella hídrica como base de una evaluación de impacto. Diferentes autores consideran que la huella hídrica volumétrica, aunque es un indicador útil para la cuantificación del uso del agua y la perspectiva de la gestión de los recursos hídricos, no refleja los potenciales impactos ambientales y sociales del consumo de agua, porque proporciona sólo una parte de la información (Ridoutt & Pfister, 2010).

Así pues, podemos encontrar estudios que definen los colores de la huella hídrica, pero omiten esta distinción en el proceso de cuantificación. Algunos estudios optan por centrarse en la contabilidad de la huella hídrica azul, debido a que los recursos de agua azul son generalmente escasos y tienen mayores costos de oportunidad que el agua verde. Otros autores como Ridoutt y Pfister (2010) sostienen que el agua verde no debe ser incluido en los estudios de huella hídrica debido a que “el uso de agua verde no contribuye a la escasez de agua desde una perspectiva de la gestión del agua –el agua verde no contribuye a los caudales ambientales ni es accesible para otros usos productivos” (Chenoweth et al., 2013). Sugieren que como el agua verde se encuentra únicamente a través de la ocupación del suelo se le debe considerar como un impacto del uso del suelo dentro de un ACV ambiental, en lugar de una huella hídrica.

Otros autores, sostienen que los recursos hídricos verdes deben ser considerados, porque al igual que los recursos de agua azul son limitados y por lo tanto escasos, además de que pueden ser muy variables en función del ciclo hidrológico y los cambios producidos por el calentamiento global. Adicionalmente, los recursos hídricos verdes pueden ser sustituidos por el agua azul y en el caso de la agricultura a la inversa (Jefferies et al., 2012 en Chenoweth et al., 2013), especialmente en las zonas donde los recursos hídricos azules son escasos, por lo que se puede obtener un cuadro completo sólo por la contabilidad de ambos. “La razón para incluir el uso del agua verde es que el enfoque histórico de ingeniería del agua azul ha dado lugar a la infravaloración de agua verde como un factor importante de producción” (Falkenmark, 2003; Rockström, 2001; en Chenoweth et al. 2013. En relación con la huella hídrica gris, puesto que no es un uso consuntivo, los impactos ambientales de las aguas grises se abordan más adecuadamente por medio de otras categorías de impacto, como la eutrofización o toxicidad (Milà i Canals, Chenoweth, Chapagain, Orr, Antón, & Clift, 2009), por lo que, los aspectos de calidad del agua pueden ser considerados más bien a través de otras herramientas como la modelización de la calidad del agua o la ECV.

Otros trabajos consideran sólo el uso consuntivo del agua. Tienen en cuenta la huella hídrica azul estrés ponderada, calculada como la huella hídrica azul en cada punto del ciclo de vida de un producto multiplicada por un indicador geográfico local de estrés hídrico (Chenoweth et al., 2013). Si bien este resultado permite evaluaciones regionalizadas (UNEP & KOICA, 2010), la WFN se opone a su uso con el argumento de que las cifras ponderadas no representan volúmenes reales (Morrison et al., 2010), y no tienen sentido desde la perspectiva de la gestión de los recursos hídricos (Ercin & Hoekstra, 2012) ya que pueden ocultar datos temporal y espacialmente explícitos. La idea de los volúmenes ponderados de agua basado en la escasez de agua local es una idea común en la ACV, “la confusión es que algunos investigadores en esa comunidad tratan la huella hídrica como un indicador de impacto ambiental, cuando en realidad se trata de un indicador de presión ambiental, que mide la intensidad del uso de los recursos” (Ercin & Hoekstra, 2012)

4.3.3. Enfoques de ACV para la estimación de los impactos del uso del agua

Las evaluaciones del impacto del uso del agua en los estudios de ACV se calculan incorporando el uso del agua de las empresas y sus descargas con factores de caracterización que reflejan el contexto local, en lo relacionado con factores como la disponibilidad de agua, la escasez y el nivel de acceso a recursos hídricos por parte de los

individuos de una cuenca (UNEP & KOICA, 2010). Cabe anotar que ha habido una falta de concordancia en lo relacionado con los modelos para evaluar los datos disponibles dentro del ACV, por lo que el ACV sigue avanzando hacia este propósito. La nueva norma Internacional ISO 14046 espera ser un paso importante en esta dirección.

El proceso de integración de la huella hídrica en los inventarios del ACV es relativamente nuevo, puesto que los trabajos de ACV no incluían tradicionalmente el consumo de agua dulce como un impacto (Chenoweth et al., 2013). En los últimos años se han publicado varios estudios que proponen integrar los métodos de huella hídrica con una mayor capacidad para cuantificar los impactos ambientales y complementar las metodologías de ACV existentes (Chenoweth et al., 2013). En la literatura del ACV hay una variedad de alternativas metodológicas que difieren en lo referente al tipo de agua considerada y si representa o no la escasez de agua local, y en cuanto a los aspectos de calidad (Berger y Finkbeiner, 2010 en Chenoweth et al., 2013). Asimismo, se encuentran trabajos que cuantifican los posibles impactos en la salud humana (Boulay, Bulle, Bayart, Deschênes & Margni, 2011), en los ecosistemas y el en el agotamiento de los recursos (Milà i Canals et al., 2009; Pfister et al, 2009.), mientras que otros no lo hacen. Por otro lado, están los enfoques para “evaluar los impactos potenciales del uso del agua causados por una pérdida de funcionalidad (debido al deterioro de la calidad del agua) para usuarios humanos” (Boulay et al., 2011). Además, existen discrepancias respecto al indicador de categoría de impacto final, entre indicadores del punto medio (orientados a los problemas con un enfoque científico más específico) o de punto final (orientado a los daños, que es más fácil de entender para los consumidores) (Kounina et al., 2013 en Chenoweth et al., 2013) y en relación con el indicador de escasez a utilizar con el fin de dar cuenta de la escasez de agua local.

4.3.4. El método Ecológico de la Escasez

Frischknecht, Steiner y Jungbluth, (2009) desarrollaron el Método Ecológico de Escasez. Uno de los primeros métodos que tiene en cuenta las condiciones regionales como un factor de caracterización, considerando el uso del agua que debe evaluarse dentro de un contexto local (UNEP & KOICA, 2010). En este caso, el uso del agua se define como la entrada total de agua dulce extraída para la producción o el consumo. “El uso de agua se agrupa en seis categorías que van desde escasez de agua baja (con menos del 10% de los recursos de agua dulce disponibles) a extrema (con más del 100% de los recursos de agua dulce disponibles)” (Jeswani & Azapagic, 2011). La evaluación de los impactos, se realiza determinando los niveles relativos de estrés hídrico, mediante el porcentaje de los recursos hídricos renovables totales consumido, se le da a cada uno de los niveles un factor de ponderación, basado en los valores del agua disponible extraída, que puede ser utilizado para caracterizar los volúmenes de uso de agua, por lo que sirven como un indicador aproximado de impacto relativo (UNEP & KOICA, 2010). Aunque este método suizo puede ser aplicado a nivel de una cuenca, región o país, los factores de ponderación nacionales no son un buen reflejo de la escasez de agua local para países heterogéneos, debido a que no logra captar las variaciones estacionales, al emplear el agua disponible extraída anual (Jeswani & Azapagic, 2011).

4.3.5. El enfoque de Milà i Canals et al.

Milà i Canals et al. (2009) intentaron identificar en los inventarios del ciclo de vida diferentes tipos de uso del agua, incluyendo tanto la fuente hídrica como el tipo de uso del agua dulce (Jeswani & Azapagic, 2011). Las fuentes las clasifican como agua azul y verde; y el uso de agua en uso por evaporación y no evaporación (Berger & Finkbeiner, 2010 en Arango, 2013). El método sugiere que el agua verde y el uso de agua por no evaporación de una unidad hidrológica no deben ser considerados en la evaluación de impacto del ciclo de vida

porque su uso no provoca impactos ambientales relevantes desde una perspectiva de los recursos, es decir, impactos relacionados con una menor disponibilidad de agua para otros usuarios y efectos sobre los ecosistemas de agua dulce (Jeswani & Azapagic, 2011).

Milà i Canals et al. (2009) cuantifican dos vías de impacto a través de las cuales el uso de agua dulce puede afectar la oferta: los impactos en los ecosistemas de agua dulce y el agotamiento de los recursos. Determinan las siguientes vías de impacto resultantes del uso del agua: aguas superficiales y subterráneas por usos de evaporación, uso del suelo, y el agua fósil como los flujos de agua críticos a medir dentro de la fase de inventario (UNEP & KOICA, 2010). Para la evaluación del volumen de agua que puede afectar a los ecosistemas, el método propone el uso de un indicador de estrés hídrico como un factor de caracterización de punto medio. “El indicador de estrés hídrico se define como la proporción entre la extracción de agua de una cuenca fluvial y el agua disponible para uso humano” (Smakhtin et al., 2004 en Jeswani & Azapagic, 2011). El agua disponible es la diferencia entre la cantidad total de agua disponible en la cuenca y la demanda estimada de agua del medio ambiente necesaria para el mantenimiento de los ecosistemas de la cuenca (Jeswani & Azapagic, 2011). Las cuencas se clasifican así: “un poco explotada (indicador de estrés hídrico $<0,3$); moderadamente explotada ($0,3 \leq$ indicador de estrés hídrico $<0,6$); fuertemente explotada (indicador de estrés $0,6 \leq$ agua <1) y sobreexplotado (indicador de estrés hídrico > 1)” (Smakhtin et al., 2004; en Jeswani & Azapagic, 2011).

Si bien el cálculo del indicador de estrés hídrico a nivel de las cuencas hidrográficas proporciona detalles adicionales, dichos análisis no reflejan plenamente el nivel de estrés sobre los recursos hídricos locales, ya que al basarse en un promedio anual, no capturan las variaciones estacionales del flujo de agua. Además, el método no puede emplearse para las regiones que no pertenecen a las cuencas hidrográficas (Jeswani & Azapagic, 2011).

4.3.6. El enfoque de Pfister et al.

A diferencia del enfoque de Milà i Canals et al. (2009), este método considera únicamente el consumo de agua azul, es decir, el consumo de aguas subterráneas y superficiales (Arango, 2013). Pfister et al., (2009) tienen en cuenta el punto medio y los factores de caracterización de punto final para la evaluación de los impactos ambientales del consumo de agua dulce (Jeswani & Azapagic, 2011). Proponen como factor de caracterización del punto medio el Índice Estrés Hídrico (WSI, por sus siglas en inglés), un índice más desarrollado, similar al utilizado por Frischknecht et al. (UNEP & KOICA, 2010) que “indica los efectos del consumo de agua en relación con su escasez” (Jeswani & Azapagic, 2011). Este índice se puede aplicar a cualquier escala espacial, aunque recomiendan que los impactos del uso del agua se evalúen a nivel de cuencas hidrográficas (Jeswani & Azapagic, 2011). Se basa en el agua disponible extraída al igual que el método desarrollado por Frischknecht et al (2006). Informa sobre la variabilidad mensual y anual de la precipitación, así como las cuencas hidrográficas con flujos fuertemente regulados. La gravedad de la escasez de agua de las cuencas se clasifica así: baja ($WSI <0,1$); moderada ($0,1 \leq WSI <0,5$); grave ($0,5 \leq WSI <0,9$) y extrema ($WSI > 0,9$) (Pfister et al., 2009; Ridoutt & Pfister, 2010).

La categoría de impacto de punto final se centra en tres áreas de protección relacionados con el consumo de agua: la salud humana (falta de agua para beber, la higiene, y el riego), la calidad de los ecosistemas (daños al funcionamiento de los ecosistemas y la biodiversidad) y la disponibilidad de los recursos de agua dulce (es decir, el agotamiento

de las reservas de agua). (UNEP & KOICA, 2010; Jeswani & Azapagic, 2011). En comparación con el enfoque de Milà i Canals et al., este enfoque toma el agua descargada a otra cuenca como consumida, mientras que para Pfister et al. es un uso por no evaporación; aunque no propone un método para hacerlo (Arango, 2013).

Los estudios más recientes han sido facilitados por el trabajo de Pfister, quien ha producido mapas globales de la escasez de agua en la escala de 0,5 minutos (aproximadamente la escala de 1 km). La escala va de 0 a 1 e incluye tanto los efectos de la precipitación / evapotranspiración (el equivalente a la huella hídrica "verde" de WFN) y el efecto de los retiros humanos (que se aproxima al componente de agua "azul"). (UNEP & KOICA, 2010)

4.3.7. Norma ISO 14046

Recientemente la ISO ha desarrollado el estándar para los principios, requisitos y directrices para la medición y comunicación de la huella hídrica de los productos, procesos y organizaciones, la norma ISO 14046:2014. Si bien esta norma se refiere a un estándar de huella hídrica, es importante tener en cuenta que el término huella hídrica en este contexto se refiere a la gama más amplia de herramientas de contabilidad de agua y no específicamente a la huella hídrica desarrollado por la WFN. Esta norma pretende establecer un marco y un conjunto de principios que permiten a los métodos de contabilidad de agua existentes ser coherentes entre sí y con otras normas.

La norma nace de la necesidad de garantizar la coherencia en la evaluación y presentación de informes de huellas hídricas. “Esta norma internacional especifica los principios, requisitos y directrices relacionadas con la evaluación de la huella hídrica de los productos, procesos y organizaciones basadas en la evaluación del ciclo de vida” (ISO, 2014). La realización y reporte de la evaluación de la huella hídrica de acuerdo a esta norma se puede llevar a cabo bien sea como una evaluación independiente, donde se evalúan únicamente los impactos relacionados con el agua; o bien como parte de una evaluación del ciclo de vida, que incluya además de los impactos del agua, un conjunto integral de impactos ambientales (ISO, 2014). El resultado de la evaluación es un valor único o un perfil de resultados de indicadores de impacto que considera los impactos ambientales relacionados con los ecosistemas, la salud humana y los recursos.

Una evaluación de la huella hídrica realizada de acuerdo con esta norma internacional: “se basa en una evaluación del ciclo de vida (según ISO 14044); es modular (es decir, la huella hídrica de las diferentes etapas del ciclo de vida se pueden resumir para representar la huella hídrica); identifica los posibles impactos ambientales relacionados con el agua; incluye las dimensiones geográficas y temporales pertinentes; identifica la cantidad de uso del agua y los cambios en la calidad del agua; utiliza el conocimiento hidrológico” (ISO, 2014). Busca unificar conceptos a nivel mundial, garantizando la transparencia, coherencia, credibilidad y consenso para evaluar e informar huellas hídricas. De acuerdo con diferentes especialistas en el tema esta norma internacional es complementaria al estándar de evaluación de la huella hídrica de la WFN.

4.3.8. The Global Water Tool – WBCSD

La herramienta Global del Agua del WBCSD –World Business Council for Sustainable Development– “es una herramienta gratuita y fácil de usar por empresas y organizaciones para mapear el uso del agua y evaluar los riesgos relacionados con sus operaciones globales y cadenas de suministro” (WBCSD, n.d.). Proporciona información sobre el número

de instalaciones, trabajadores y proveedores que se encuentran en áreas con estrés hídrico, el nivel de acceso a fuentes mejoradas de agua y servicios de saneamiento, el porcentaje de extracción de agua industrial y la proyección estimada de suministro de recursos hídricos renovables por persona para el año 2025 y 2050 (UNEP & KOICA, 2010). La herramienta le permite a las empresas identificar y caracterizar los riesgos o *hotspots* en los sitios donde tienen operaciones, mediante la comparación del estrés hídrico relativo del lugar, proporcionándoles una serie de datos y mapas que reflejan información a nivel de país y de cuenca hidrográfica por medio de Google Earth. Esto le permite a las empresas priorizar sus actividades de mitigación en las instalaciones ubicadas en cuencas con escasez de agua, en donde hay más probabilidades de presentar riesgos relacionados con los recursos hídricos (UNEP & KOICA, 2010).

Al igual que la metodología de la huella hídrica desarrollada por la WFN, la Herramienta Global del Agua WBCSD se considera eficaz para identificar *hotspots*. Sin embargo, mientras la metodología de la huella hídrica profundiza en la naturaleza del uso del agua para la identificación y caracterización de los riesgos, la herramienta WBCSD destaca la ubicación geográfica como la base principal para una evaluación cualitativa de los riesgos relacionados con el agua (UNEP & KOICA, 2010). Según el WBCSD la herramienta global del agua no es un fin en sí mismo, sino el inicio de una comprensión más profunda sobre la situación del agua en las comunidades locales, razón por la cual puede ser un elemento clave en la toma de decisiones de las empresas que operan en múltiples países con contextos muy diferentes en relación con los recursos hídricos.

Entre las debilidades de ésta herramienta se encuentra que no proporciona a las empresas un sistema que permita caracterizar el uso del agua o cualquier otro intento por evaluar impactos; no aborda los riesgos relacionados con la calidad y vertimiento del agua (UNEP & KOICA, 2010) y finalmente, no proporciona orientación específica sobre las situaciones locales (WBCSD, n.d.). En relación con el último aspecto, el WBCSD colaboró con GEMI – Global Environmental Management Initiative– para desarrollar la herramienta de agua local –Local Water Tool– “una herramienta gratuita para que las empresas y organizaciones evalúen los impactos externos, los riesgos de negocio, oportunidades y planes de gestión relacionada con el uso del agua y la descarga en un lugar específico u operación” (WBCSD, n.d.).

5. LA HUELLA HÍDRICA DE COLOMBIA EN EL CONTEXTO MUNDIAL, CONTINENTAL Y SURAMERICANO

Mekonnen y Hoekstra (2011), estimaron la huella hídrica de la producción mundial en 9,1 Billones m³/año, considerando datos para los sectores agrícola, pecuario, doméstico e industrial en el período comprendido entre 1996 y 2005. De acuerdo con los autores, los países con mayor huella hídrica de la producción a nivel mundial son China, India, Estados Unidos, Brasil y Rusia. Las huellas de estos cinco países corresponden a casi el 50% de la huella hídrica de la producción global (Arévalo, 2012). A nivel continental, la huella hídrica de la producción del continente asiático corresponde a un poco más de la mitad de la huella hídrica global, seguido por América (26%), África (12%), Europa (9%) y Oceanía (2%).

En el contexto americano, América del Norte produce la mitad de la huella hídrica, Suramérica el 38,5% y Centroamérica el 11,5%. La huella hídrica total de la producción en Suramérica corresponde en un 70% a la agricultura, un 26% a la actividad pecuaria, un 3% a los usos domésticos y un 1% al sector industrial (Arévalo, 2012). Según el WWF (2012), Colombia se ubica en el tercer lugar de los países con mayor huella hídrica de la producción

a nivel de Suramérica, siendo Brasil el país que ocupa el primer puesto con más del 50% de la huella hídrica, la segunda posición la ocupa Argentina. La suma de la huella hídrica de la producción de sólo estos tres países asciende aproximadamente al 80% de la huella hídrica de la producción en Suramérica.

De acuerdo con el primer estudio nacional de huella hídrica “Una mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica” llevado a cabo por el WWF, la distribución de los diferentes tipos de huella para el caso del sector agrícola, corresponde en un 88% a la huella hídrica verde (34.242 Mm³/año¹), en segundo lugar, se encuentra la huella hídrica azul con un 7% (2.804 Mm³/año) y por último, la huella hídrica gris con un 5% (2.098 Mm³/año).

Como se ha visto, la agricultura es, en general, el sector con mayor consumo de agua dulce, por lo que su huella hídrica total es bastante amplia en comparación con sectores como el energético, doméstico, industrial o servicios. En efecto, en el contexto colombiano “el sector agrícola es el primer sector en términos de consumo sobre otros seis sectores analizados: Energía, Doméstico, Acuícola, Pecuário, Industrial y Servicios” (Arévalo, 2012). Si bien, los estudios muestran que el consumo de agua en la industria es de bajo impacto en comparación con la agricultura, a menudo se puede ignorar la importancia de considerar los impactos locales que puede tener en las fuentes y en la disponibilidad de agua.

5.1. La huella hídrica en la industria del cemento

La industria del cemento es considerada como un consumidor menor de agua, comparado con otras industrias como la química y energética, y con otras de los materiales de la construcción como el hierro y el acero (Cemex, 2012). De acuerdo con Cemex (2012): “la demanda de agua de la cadena de valor del concreto (cemento, concreto y agregados) representa aproximadamente 1 por ciento de la demanda total de agua de la industria y 0,2 por ciento de la demanda global de agua”. Si bien, las empresas de la industria han empezado a prestarle mayor atención al papel que juegan los recursos hídricos en la sostenibilidad ambiental, social y económica, los esfuerzos para evaluar la huella hídrica se han llevado a cabo recientemente y las metodologías empleadas son heterogéneas. Razón por la cual, hay una notoria carencia de estudios de huella hídrica relacionados con el sector cementero. Los primeros acercamientos han sido llevado a cabo por las empresas al incluir en sus informes de sostenibilidad algunos cálculos relacionados con la huella y la gestión del recurso.

El estudio más relevante para la industria del cemento en Colombia, es el proyecto SuizAgua Colombia. En septiembre de 2013, publicaron la versión 3.0 del proyecto en el cual presentan los resultados para la fase I de la evaluación de la huella hídrica de cuatro empresas suizas con operación en Colombia. Una de ellas es Holcim (Colombia) S.A. perteneciente al grupo suizo Holcim, líder en la industria mundial del cemento. La evaluación de huella hídrica fue llevada a cabo para los años 2009 a 2012, mediante la metodología basada en el Análisis de Ciclo de Vida, una evaluación del impacto de punto medio basado en el Índice de Impacto Hídrico (WIIX por sus siglas en inglés)² y una evaluación de impactos de punto final que considera los efectos en la salud humana y la

¹ Mm³ / año = Millones de metros cúbicos por año

² Evaluación del impacto de punto medio basado en el WIIX. Este método estima el impacto en la disponibilidad del recurso hídrico mediante el cálculo de un índice que tiene en cuenta: el consumo, la calidad, y la escasez del agua en un área geográfica específica. Esta última utiliza el Índice de Estrés Hídrico de Pfister, et al. (2009).

calidad de los ecosistemas. El objetivo del proyecto consiste en desarrollar capacidades de medición de huella hídrica en las empresas, con el fin de facilitar su replicación y ampliación, identificando los puntos clave de uso de agua, con el fin de proponer medidas de reducción de la huella hídrica.

Como principales conclusiones del proyecto para la cementera Holcim (Colombia) S.A. se encuentra que la mayor proporción de huella hídrica está asociada al uso directo de agua en la planta de agregados, seguido por el consumo de aditivos en la planta de concreto y el uso indirecto del agua relacionada con el consumo de electricidad en la planta de cemento (COSUDE, 2013), por lo que, estas tres operaciones se asocian con el Índice de Impacto Hídrico más alto. Adicionalmente, que los impactos potenciales en la salud humana y los ecosistemas están asociados principalmente al consumo de carbón (COSUDE, 2013). El estudio concluye que a nivel de agua consumida, para la producción de 1 m³ de concreto se consumen entre 2,1 y 2,8 m³ de agua, de allí, la mayor parte ocurre directamente en las plantas evaluadas, seguido por el consumo de agua indirecto debido al consumo de energía (electricidad, diesel, carbón) y la cadena de suministro, responsable en promedio de 0,2 m³ del agua consumida (COSUDE, 2013).

6. DESARROLLO METODOLÓGICO

6.1. Localización del área de estudio

La Planta Rio Claro se localiza geográficamente a 05°55' N y 74°47' O en el Corregimiento La Danta, Municipio de Sonsón, Antioquia. Se encuentra localizada a 165 kilómetros de Medellín, sobre la autopista Medellín Bogotá. Tanto la planta Rioclaro como las explotaciones de caliza, esquisto y arcilla pertenecen a la subregión Bosques de Cornare en jurisdicción del municipio de Sonsón.

El área total concesionada por títulos mineros es de 2200 Ha, de los cuales 350 Ha han sido intervenidas para minería y 210 Ha con infraestructura.

El ingreso a la planta se realiza por el asentamiento de Jerusalén, por medio de una vía completamente pavimentada con una longitud aproximada de 7 kilómetros.

Los predios de la planta y sus áreas de títulos se encuentran en la cuenca hidrográfica del Medio Magdalena, subcuenta del Rio Claro - Cocorná Sur.

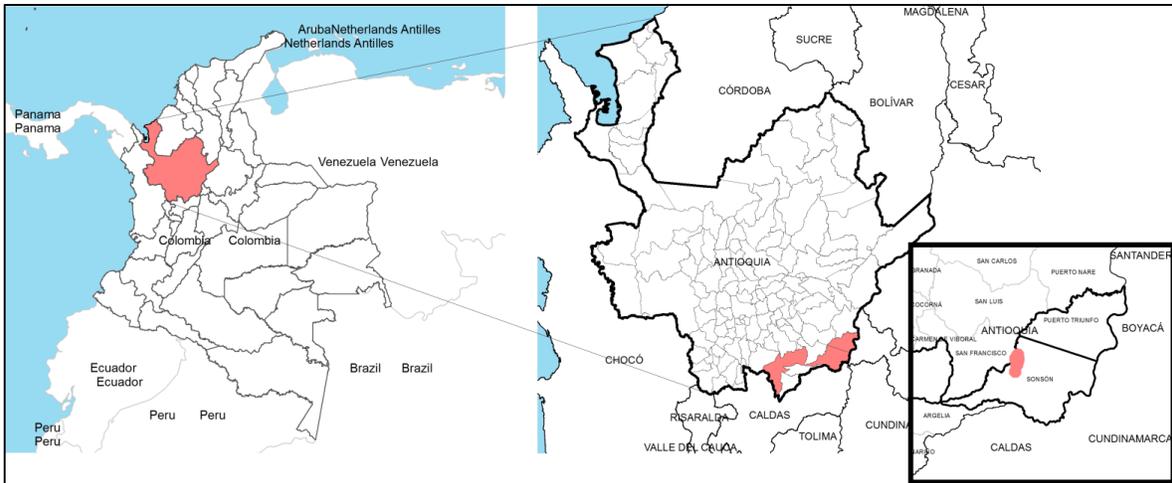


Figura 1. Esquema de contextualización geográfica del área de estudio sin escala
Fuente: Plan de gestión del riesgo 2014. Cementos Argos

6.2. Desarrollo del estudio

Partiendo de la premisa de que es importante distinguir entre las subcategorías de la huella hídrica: azul, verde y gris, en la evaluación de este indicador ambiental para el caso de estudio, debido a que la huella hídrica azul debe incluir los usos domésticos de la mano de obra, la huella hídrica verde puede resultar relevante en relación al uso de materias primas naturales y su humedad intrínseca y la huella gris como posible consecuencia del uso del agua azul. De acuerdo con estas consideraciones y para abordar el análisis, se toman como fuentes de información los datos de extracción de materias primas, producción, consumos de agua, generación de energía y energía comprada de las bitácoras de producción suministradas por Cementos Argos, además se realizan campañas de campo para realizar la caracterización de las fuentes de suministro de agua, los efluentes y verificación de los datos proporcionados.

Por otro lado, con el fin de estimar la oferta natural del recurso hídrico de la cuenca del río Claro y las subcuencas que pueden presentar alguna intervención con el proyecto, se tuvieron en cuenta diferentes fuentes de información como cartografía, datos de estaciones meteorológicas cercanas, geología y coberturas terrestres. En lo que respecta a la cartografía, se procesó la información de las planchas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, escala 1:25.000, 168-I-A, 168-II-C, 168-III-A, 168-III-B, 168-III-C, 168-III-D, 168-IV-A. Se consultó además, la información procesada para el Sistema de Información Geográfico –SIG– de la zona, con el objeto de poder determinar el modelo digital del terreno –MDT– y los mapas climáticos, que requieren interpolación y procesamiento de información distribuida espacialmente. Igualmente, se toman estudios anteriores desarrollados por Cementos Argos como el Plan de Uso Eficiente y Ahorro del Agua –PUEAA–, Estudio de Impacto Ambiental –EIA– e información de la Corporación Autónoma Regional de los Ríos Negro y Nare –Cornare–.

Si bien, el presente estudio corresponde a una investigación detallada referente al cálculo de la huella hídrica de los diferentes procesos productivos que se dan al interior de las instalaciones de una planta de cemento, tomando como caso de estudio la planta de Rioclaro, propiedad de Cementos Argos y adoptando como año referencia el 2013, fue

necesario recurrir a información de años anteriores (2011 y 2012) para reconstruir la información faltante de consumos de agua. Vale mencionar que el punto de partida del estudio fue la construcción del balance hídrico, el cual se presenta en la Figura 3 y la Tabla 6. Este insumo, permite definir las líneas de flujo de agua, los usos, pérdidas del sistema, descargas y los diferentes actores dentro de los procesos.

Con todo lo anterior, se elaboró la base de datos usada para las estimaciones necesarias para el estudio y la construcción de los índices.

Como materiales de apoyo, se uso la herramienta desarrollada por la el Consejo Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCS por sus siglas en ingles), conocido como Global Water Tool – GWT (2012) y para la evaluación de la huella hídrica se tomo como documento de referencia el manual de evaluación de la huella hídrica preparado por la WFN (Hoekstra, et al. 2011). Para la identificación y calificación de impactos, asociados al consumo de agua y vertimientos, se toma la metodología de Conesa (2010).

6.2.1. Análisis de Estrés Hídrico

Con el fin de tener un contexto general de la zona objeto de análisis y poseer información amplia sobre la disponibilidad hídrica de la misma, se considera relevante determinar posibles riesgos asociados al recurso hídrico y hotspots, mapeando el uso de agua en dicha zona.

El análisis de riesgo por estrés hídrico se calculó por medio de la hoja de cálculo realizada, de la GWT (2012), la cual consta de dos partes:

1. Un libro de Excel para la ubicación del sitio y la entrada de datos del uso del agua que va a generar un inventario de agua, reportando indicadores (GRI, CDP Water, DJSI y Bloomberg), otros riesgos y métricas de rendimiento.
2. Un sistema de cartografía en línea que permite a las empresas ubicar sus operaciones y las de la cadena de suministro en un mapa, la cual se relaciona con bases de datos de agua externas.

La herramienta también está vinculada a Google Earth que proporciona una visión espacial de la ubicación del sitio de la empresa en relación a la información geográfica detallada, incluyendo el agua de la superficie y la densidad de población.

Los beneficios del uso de esta herramienta se resumen en que establece los riesgos relativos de agua de una empresa, puede ser utilizado en combinación con otras herramientas para facilitar la toma de decisiones, puede ser usado como herramienta de seguimiento de los datos ambientales internos de una compañía, permite una comunicación efectiva con los diferentes grupo de interés, asiste con la estrategia de gestión del agua a largo plazo y puede ser utilizado como una herramienta estratégica durante la evaluación del desarrollo de nuevos proyectos, asimismo para las empresas que enfrentan el desafío de operar en múltiples países con contextos muy diferentes de agua. (WBCS, n.d).

La GWT no proporciona orientación específica sobre las situaciones locales. Esto requiere un análisis más profundo y sistemático a nivel de planta. Tal como lo detalla el WBCS en su página: “El GWT no es un fin en sí mismo, sino el inicio de una comprensión mucho más profunda de la situación del agua en las comunidades locales”. (WBCS, n.d). Considerando lo anterior y con el fin de poder realizar un análisis a nivel local sobre la oferta y demanda del recurso, se estimaron los diferentes caudales para ser comparados con los consumos

actuales, donde los caudales máximos constituyen información de importancia en la evaluación de la amenaza hidrológica a que está sometido el tramo de cada corriente estudiada y las obras de captación y aprovechamiento. El caudal medio permite acercarse a la evaluación de la disponibilidad u oferta hídrica y da una idea del potencial hídrico de la cuenca, así mismo, es útil como herramienta para la calibración de modelos de simulación hidrológica, con los que se estiman los caudales diarios. Los caudales mínimos permiten tener información sobre la capacidad de suministro de agua de la fuente aprovechada durante los períodos excepcionalmente secos. Este último, se usó para establecer relaciones entre la demanda actual y las posibles temporadas de estrés hídrico para cada subcuenca.

Las metodologías seguidas en los estimativos de caudales están inmersas en las técnicas de evaluaciones hidrológicas con información escasa, teniendo en cuenta que en las corrientes estudiadas no hay estaciones de registro de caudales que permitan análisis directos de las variables de interés. En vista de ello, se consideró indispensable para los cálculos de caudales extremos (mínimos y máximos) utilizar metodologías de manejo de información escasa y en la determinación de caudales medios métodos indirectos de estimación de las variables que condicionan su valor. Para cada variable se emplearon varias metodologías, lo cual permite contrastar resultados y aportar elementos de juicio en la definición de los caudales de interés. Lo anterior se justifica, además, en la carencia de criterios concluyentes sobre los métodos que mejor ajustan en las corrientes colombianas. La información meteorológica empleada en los estimativos hidrológicos se presenta en el la Tabla 1.

Tabla 1. Estaciones de registro hidrológico empleadas en el estudio. IDEAM

CÓDIGO	TIPO	NOMBRE	MUNICIPIO	ESTE	NORTE	COTA
2308514	CO	San Francisco	San Francisco	1.151.324	886.695	1306
2307501	CP	Río Claro	Sonsón	1.139.319	914.630	449
2308719	LG	La Garrucha	San Luis	1.148.340	906.474	403
2308720	LG	Pailania	Cocorná	1.151.345	885.310	980

Fuente: Elaboración propia

La información de caudales de la estación La Garrucha, ubicada en el río Samaná, cuenca vecina de la del río Claro, se consultó con la idea de buscar la calibración de un modelo de simulación de caudales a nivel diario.

La información de precipitación de las estaciones San Francisco y Río Claro, por su ubicación, la primera de ellas en la zona intermedia-alta de la cuenca y la segunda en la parte baja, permite caracterizar aceptablemente la variabilidad espacio-temporal de ésta variable. Así mismo la estación Río Claro, recopila información representativa del régimen pluviométrico de las corrientes menores del estudio.

Con el objeto de apreciar la variabilidad temporal de la precipitación en la cuenca se determinaron las series de precipitación mensual, junto a esta los hietogramas de precipitación media mensual.

Con base en la información desarrollada se estimaron las características físicas de las cuencas hidrográficas, las cuales modulan junto con las variables hidroclimatológicas el comportamiento de su régimen de escorrentía, que se manifiesta en las magnitudes de los caudales a diferentes escalas espacio-temporales, teniendo en cuenta esta relación causal de los parámetros morfométricos para cada sitio de estudio. En la Figura 2 se aprecia la

ubicación relativa entre las cuencas estudiadas, así como la nomenclatura que permite la codificación de las cuencas para este estudio.

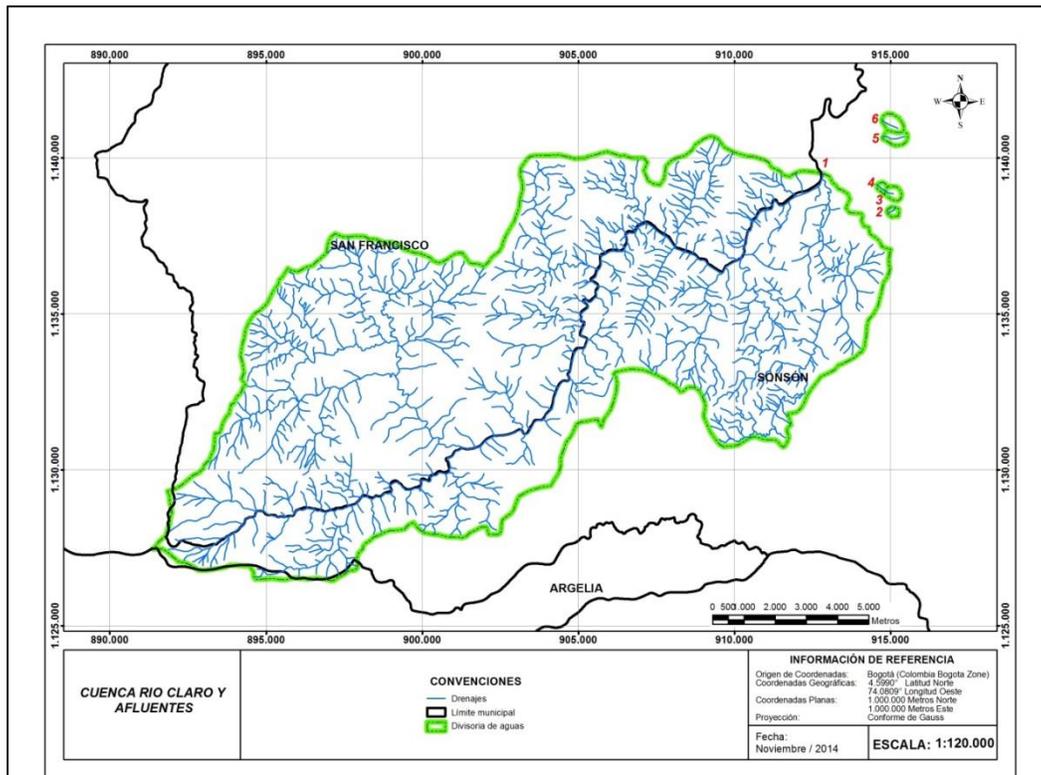


Figura 2. Ubicación de las cuencas estudiadas
Fuente: Elaboración propia

Esta información es básica para la aplicación de los modelos hidrológicos que permiten los estimativos de caudales ecológicos y caudales máximos. Lo anterior se lleva a cabo con el uso de herramientas como HidroSig, ArGis, HEC HMS 3.5 y HEC-HMS 4.0.

6.2.2. Cálculo de la huella hídrica

Debido a que el caso de estudio corresponde a una serie de procesos que tienen como fin la manufactura de un producto, el análisis de la huella hídrica se desarrolla bajo la metodología descrita por la WFN para la huella hídrica de la fase de un proceso, y como el objetivo de esta investigación es la cuantificación de los tres colores de la huella hídrica para los diferentes procesos llevados a cabo en la planta de producción de cemento Rioclaro, se decide hacer las siguientes distinciones:

Procesos productivos

1. Extracción de caliza, esquisto y arcilla en las minas propias, incluida la trituración.
2. Producción de clinker y cemento.
3. Generación de energía termoeléctrica.

Procesos auxiliares

4. Alojamiento del personal operativo en campamentos

Se decide incluir ésta última variable como un proceso auxiliar, pues si bien no hace parte del proceso productivo en sí, es un factor de entrada, el cual se considera que genera un

consumo y contaminación de agua, que puede resultar significativo al momento de evaluar la huella hídrica de la actividad, y que a futuro, si se desea evaluar la huella hídrica de la cuenca a la que está asociada, es relevante tenerla presente para el ordenamiento de la misma.

Vale la pena resaltar que se considera la huella hídrica directa de los procesos internos de producción, y la indirecta, para las materias primas naturales (mineral de hierro, escoria, puzolana, retal de ladrillo, yeso, carbón) y la energía, aunque no se consideran los agentes de la cadena de suministro por la complejidad de los mismos y la inexistencia de bases de datos o información que aporte lo necesario para su análisis. Por tanto, la delimitación de los procesos involucrados está localizada en una zona geográfica específica, la cuenca de Rioclaro, y los límites prediales activos; lo que se traduce en que para el caso de las minas, solo se consideran los frentes de explotación activos y para el caso de producción de clinker y cemento, generación de energía y procesos auxiliares, se toman los diferentes componentes del proceso.

El análisis general parte del balance hídrico de los procesos identificados anteriormente, los cuales se detallan en la Figura 3. Dicho balance se construyen con la información descrita anteriormente y tiene en cuenta las consideraciones que se describirán para cada cálculo.

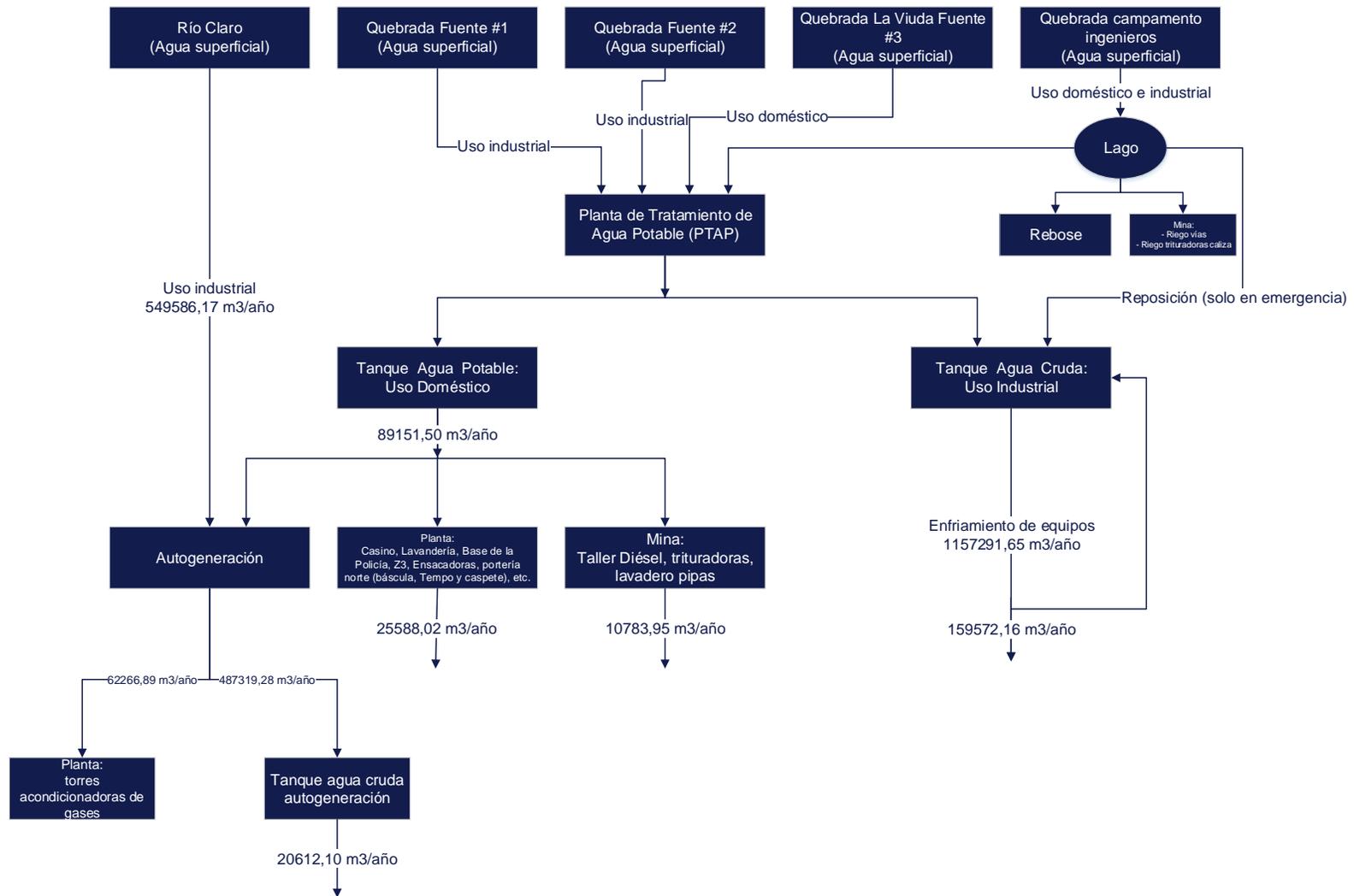


Figura 3. Diagrama de flujo de los procesos. Planta Rioclaro.
Fuente: Elaboración propia

6.2.3. Huella hídrica azul

De acuerdo con la definición de huella hídrica azul dada por la guía de la WFN, esta corresponde a las pérdidas de agua dulce captada y usada que se evapora, incorpora al producto, no vuelven a la misma zona de flujo o que no vuelve en el mismo periodo de tiempo. Es necesario subrayar, que para el caso estudiado las dos últimas condiciones no se dan debido a que no se tienen trasvases y todas las actividades están dadas en la misma cuenca, además, los tiempos de retorno de flujo no superan las 24 horas.

Ecuación 1. Fórmula para el cálculo de la huella hídrica azul

El sistema de acueducto y agua industrial de la Planta Ríoclaro de Cementos Argos está conformado principalmente por tres fuentes de abastecimiento de agua cruda; además, existe una fuente que proviene del campamento de ingenieros usada para riego y casos de emergencia, esta llega igualmente a la planta de agua potable, las tres fuentes principales están conformadas por las siguientes estructuras: Bocatoma, aducción, desarenador y conducción de aguas. Posteriormente, se encuentra la planta de potabilización y la red de distribución. Adicionalmente, se tiene una concesión de agua industrial sobre el río Claro, la que ingresa cruda al proceso, sin ningún tipo de tratamiento.

Si bien el año objeto de análisis es el 2013, fue necesario construir una base de datos con la información que contemplara los años 2011, 2012 y 2013 a fin de poder completar los datos faltantes basados en las producciones, consumos y efluentes. Para el caso de los consumos, en los meses en que se carecía de información en los diferentes periodos, se decide usar el promedio móvil con los datos existentes, teniendo en cuenta que el mínimo número de datos era de cinco meses continuos. Para los módulos de consumo de agua en las diferentes áreas se decide incluir el Índice de Agua No Contabilizada –IANC–, distribuido en la proporcionalidad de consumo histórica de las mismas, pues se analiza que aunque se desconoce el uso y descarga del agua, inevitablemente hubo un consumo que contribuye a la huella hídrica.

El uso doméstico no solo se refiere al agua tratada y desinfectada que es usada en los servicios sanitarios, lavamanos, duchas, lava ojos, grifos y casino, sino que también considera las áreas que hacen uso de este tipo de agua como son el lavadero de la maquinaria amarilla y lavadero de pipas, y el agua industrial correspondiente al agua de enfriamiento de equipos, torres acondicionadoras, riego de vías de los frentes de explotación y autogeneración de energía.

Para el cálculo de la huella hídrica de la energía comprada a la red, se toma como base de cálculo el estudio de la Evaluación de la huella hídrica en la cuenca del río Porce (CTA, 2013), y se establece como base el resultado obtenido para el embalse menos eficiente, Riógrande I, para no generar subestimación de esta variable. Lo anterior, poniendo de manifiesto que la energía eléctrica es proporcionada a través del sistema interconectado Nacional, y que de acuerdo con el análisis de suministro y proveniencia de la misma, ésta es generada principalmente a partir de centrales hidroeléctricas cercanas. La huella hídrica de la energía comprada se carga a la producción de clinker y cemento, ya que es el mayor consumidor de la misma. La huella hídrica del proceso de Autogeneración, queda cargada al mismo, para no generar una doble contabilidad.

6.2.4. Huella hídrica verde

A pesar de que muchos autores consideran que el agua verde proporciona más información para la agricultura en relación con la industria, se decide adelantar este estimativo con el fin de comprender mejor esta huella y determinar si es o no relevante. Mas aún, teniendo en cuenta las condiciones hidroclimatológicas de la zona, donde la precipitación es significativamente alta, y la precipitación efectiva puede ser importante para los materiales usados a lo largo de la cadena de la producción. Se introduce en el cálculo los diferentes materiales extraídos en las minas propias (caliza, esquisto y arcilla) y las demás materias primas naturales proporcionadas por terceros, y su respectiva humedad.

Ecuación 2. Fórmula para el cálculo de la huella hídrica verde

Hay que mencionar que se considera que el agua contenido en los diversos materiales finalmente es evaporada en el proceso de clinkerización y la molienda de cemento, puesto que las altas temperaturas dadas allí, dan una humedad máxima de salida del producto de 0,8%.

6.2.5. Huella hídrica gris

Este balance toma como referencia el cálculo para los focos puntuales de contaminación descrito por el manual de la WFN, dado que las descargas se realizan a cuerpos de agua superficiales, donde la carga puede estimarse midiendo el volumen de efluente y la concentración de una sustancia en el mismo.

Ecuación 3. Fórmula para el cálculo de la huella hídrica gris

Donde

Volumen de agua del efluente

Concentración del contaminante en el efluente

Volumen de agua de la abstracción

Concentración real de la toma de agua

Concentración máxima permitida

Concentración natural

La carga de agua se define como la sobrecarga que ya figuraba en el cuerpo de agua receptor antes de la injerencia de la actividad considerada

Se decide incluir la huella hídrica gris de la mano de obra y los diferentes procesos auxiliares, cuyos cálculos se basan en el cumplimiento de la norma internacional, debido a

la falta de regulación o establecimiento de criterios u objetivos de calidad del agua para la cuenca de estudio y de normatividad nacional sobre la materia. Cabe la pena mencionar que en los cálculos no se incluyeron los diferentes sistemas de aguas lluvias, que cumplen con la función de retención de sedimentos correspondientes al material arrastrado por efectos de la escorrentía, esto debido a que dichas aguas no son usadas o intervenidas en ninguna de las etapas del proceso productivo y por tanto no se consideran como huella gris.

A lo anterior, se le suma que para la industria del cemento se cuenta con el Protocolo para el reporte del agua (2014), desarrollado por la Iniciativa del Cemento Sostenible (CSI por sus siglas en inglés), el cual recomienda reportar los Sólidos Suspendidos Totales –SST– y pH, y no referencia parámetros para el caso de las aguas residuales domésticas.

Las concentraciones máximas de los parámetros de comparación fueron tomados del trabajo de Arango, Martínez y Ríos (2013) para los SST. El pH fue tomado según la norma EPA (2009) los cuales se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Concentraciones máximas permisibles

Parámetro	Objetivos de calidad internacional
SST (mg/l)	25
pH (unidades de pH)	6,5 – 8,5

Las concentraciones naturales de pH y SST se toman como 7 unidades de pH y 0 mg/l, respectivamente.

6.3. Evaluación de impactos

La evaluación de los impactos se llevó a cabo utilizando la metodología propuesta por Conesa (2010), en la cual se genera una matriz de importancia de los impactos, a partir de la valoración cualitativa de los criterios descritos a continuación, lo cual da una idea del efecto que produce cada actividad sobre el factor ambiental afectado. Para el caso práctico solo se va hacer referencia a los impactos sobre el agua.

- Naturaleza: expresa el carácter benéfico (+), perjudicial (-) o difícil de predecir (X), de las distintas acciones sobre los diversos factores considerados.
- Intensidad (I): se refiere al grado de incidencia de la acción sobre el factor. La valoración estará comprendida desde una afección mínima, hasta la destrucción total del factor en el área en que se produce el efecto.
- Extensión (EX): corresponde al área de influencia teórica del impacto en relación con el entorno del Proyecto (% de área, respecto al entorno, en que se manifiesta el efecto).
- Momento (MO): es el tiempo que transcurre entre la aparición de la acción y el comienzo del efecto sobre el factor del medio considerado.
- Persistencia (PE): se refiere al tiempo que, supuestamente, permanecería el efecto desde su aparición y, a partir del cual el factor afectado retornaría a las condiciones iniciales previas a la acción por medios naturales, o mediante la introducción de medidas correctoras.
- Reversibilidad (RV): expresa la posibilidad de retornar a las condiciones previas a la acción, por medios naturales, una vez que aquella deja de actuar sobre el medio.

- Recuperabilidad (MC): se refiere a la posibilidad de retornar a las condiciones iniciales previas al Proyecto, por medio de la intervención humana (introducción de medidas correctoras).
- Sinergia (SI): se refiere al reforzamiento de dos o más efectos simples, es decir que al producirse estos al mismo tiempo el efecto es mayor que si se presentan de manera independiente.
- Acumulación (AC): da idea de un incremento progresivo de la manifestación del efecto, cuando persiste de forma reiterada la acción que lo genera.
- Efecto (EF): es la relación causa – efecto, es decir, que podrá ser directo si la acción es directa sobre el entorno o indirecta si el efecto se presenta a partir de un efecto primario.
- Periodicidad (PR): se refiere a la regularidad con la que se manifiesta el efecto.

La importancia del impacto (I) es función del valor asignado a los criterios considerados, y se calcula mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 4. Importancia del impacto

En la Tabla 3 se presentan los rangos de calificación para cada uno de los criterios descritos.

Tabla 3. Rangos de calificación de los criterios.

Criterio	Calificación	Valor
Intensidad (I)	Baja	1
	Media	2
	Alta	4
	Muy alta	8
	Total	12
Extensión (EX)	Puntual	1
	Parcial	2
	Extenso	4
	Total	8
	Crítica	(+4 unidades)
Momento (MO)	Largo plazo	1
	Mediano plazo	2
	Inmediato	4
	Crítico	(+4 unidades)
Persistencia (PE)	Fugaz	1
	Temporal	2
	Permanente	4
Reversibilidad (RV)	Corto plazo	1
	Mediano plazo	2
	Irreversible	4
Recuperabilidad (MC)	Recuperable inmediatamente	1
	Recuperable a mediano plazo	2
	Mitigable	4
	Irrecuperable	8

Criterio	Calificación	Valor
Sinergia (SI)	Sin sinergismo	1
	Sinérgico	2
	Muy sinérgico	4
Acumulación (AC)	Simple	1
	Acumulativo	4
Efecto (EF)	Indirecto	1
	Directo	4
Periodicidad (PR)	Irregular o discontinuo	1
	Periódico	2
	Continuo	4

Fuente: Conesa (2000)

El resultado de la ponderación de los criterios (importancia del impacto), toma valores entre 13 y 100. En la Tabla 4 se presenta la calificación cualitativa de cada rango.

Tabla 4. Valoración de la importancia del impacto.

Calificación	Resultados
<24	Impactos irrelevantes o de muy poca importancia.
De 25 a 50	Impactos moderados que merecen atención para estructurar unas adecuadas medidas de manejo ambiental durante el desarrollo de las obras.
De 51 a 75	Impactos severos que merecen atención para estructurar unas adecuadas medidas de manejo ambiental durante el desarrollo de las obras.
>76	Impactos críticos que merecen una atención inmediata para buscar alternativas que minimicen su efecto.

Fuente: Conesa (2000)

6.4. Sostenibilidad de la huella hídrica

Para evaluar la sostenibilidad ambiental de la huella hídrica de los procesos considerados, se toma como base la metodología desarrollada por la WFN, la cual evalúa los criterios de calidad, disponibilidad, escasez y consumo, además, involucra los *hotspots* identificados.

7. RESULTADOS

La combinación de diversas actividades, condiciones y las interacciones que se dan en un espacio geográfico, derivan en efectos sobre y para cada uno de los actores, cuyo análisis dependerá del enfoque o profundización que se le de. Para el caso práctico, solo se evaluarán los efectos medioambientales de la huella hídrica para los diferentes procesos analizados.

7.1. Análisis de estrés hídrico

Los resultados arrojados al aplicar la herramienta de la GWT, arrojan que el área donde se ubican las operaciones es una zona con alta disponibilidad hídrica, categorizada por el

programa como una zona abundante, con un total de recursos renovables por persona mayor a 4000 m³/persona/año, tal como se muestra en Figura 4. Igualmente, se identifica la zona como un *hotspot* de biodiversidad, Figura 5.

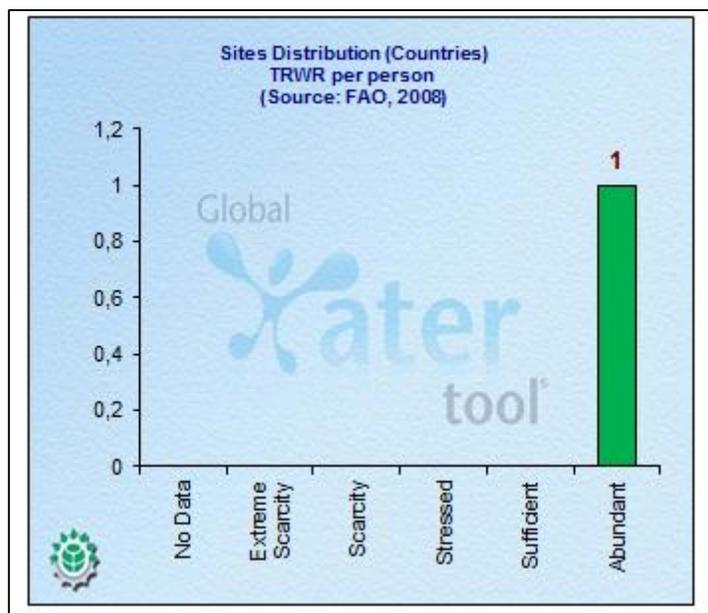


Figura 4. Total de recurso de agua renovable para la planta Rioclaro GWT
Fuente: Elaboración propia

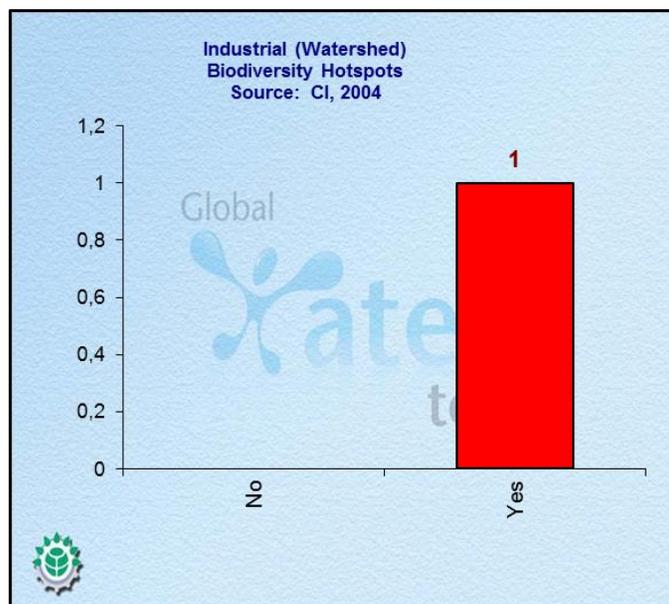


Figura 5. Hotspots de biodiversidad GWT
Fuente: Elaboración propia

Al realizar validaciones locales, cuyos estimativos hidrológicos se centran en el cálculo de los caudales mínimos y caudales ecológicos en los sitios de interés, se encuentra que los valores de precipitación media anual medidos en las dos estaciones, es decir, 3701 mm y 5133 mm, para las estaciones Rio Claro y San Francisco, permiten concluir, en primer lugar, la muy buena disponibilidad de agua en la zona y la constatación del aumento de la

precipitación con la elevación sobre el nivel del mar, es decir mayores valores de precipitación hacia la parte alta de las cuencas. La primera conclusión, valida el resultado de la herramienta de la GWT.

Si bien las subcuencas presentan una buena oferta hídrica, se evalúa la disponibilidad del recurso para las temporadas de estiaje, las cuales pueden representar un punto crítico y la exposición a un posible riesgo hídrico, al que también se le pueden asociar otros componentes como la biodiversidad. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5, la cual se entiende como el caudal mínimo estimado para las diferentes subcuencas, para determinados periodos de retorno, la actual demanda de agua y el caudal disponible si se captara el total de volumen requerido.

Tabla 5. Series de caudales mínimos estimados versus caudal requerido

Sitio	Período de retorno (años)	Gumbel	Log normal	Caudal ecológico (m ³ /s)	Caudal requerido (m ³ /s)	Caudal disponible (m ³ /s)
		Caudal (m ³ /s)				
Río Claro	2,33	3,03	2,98	1,13	0,0292	1,85
	5	2,21	2,23			1,10
	10	1,75	1,84			0,71
	25	1,32	1,49			0,36
	50	1,07	1,31			0,18
	100	0,86	1,16			0,03
Fuente 2	2,33	1,22	1,20	0,00045	0,0052	1,20
	5	0,886	0,894			0,89
	10	0,702	0,737			0,74
	25	0,53	0,6			0,60
	50	0,43	0,525			0,52
	100	0,346	0,466			0,47
Fuente 3	2,33	2,32	2,28	0,00086	0,0023	2,28
	5	1,69	1,71			1,71
	10	1,34	1,41			1,41
	25	1,01	1,15			1,14
	50	0,82	1,00			1,00
	100	0,66	0,889			0,89
Fuente 1	2,33	3,35	3,30	0,00125	0,00975	3,30
	5	2,44	2,46			2,46
	10	1,93	2,03			2,03
	25	1,46	1,65			1,65
	50	1,18	1,45			1,45
	100	0,95	1,28			1,28
	2,33	3,43	3,37	0,00128	0,00086	3,37

Sitio	Período de retorno (años)	Gumbel	Log normal	Caudal ecológico (m ³ /s)	Caudal requerido (m ³ /s)	Caudal disponible (m ³ /s)
		Caudal (m ³ /s)				
Campamento Ingenieros	5	2,49	2,52	0,00143	0,000094	2,52
	10	1,98	2,08			2,08
	25	1,49	1,69			1,69
	50	1,21	1,48			1,48
	100	0,97	1,31			1,31
	2,33	3,84	3,78			3,77
Rancho Sereno	5	2,79	2,82	0,00143	0,000094	2,82
	10	2,21	2,33			2,32
	25	1,67	1,89			1,89
	50	1,36	1,66			1,65
	100	1,09	1,47			1,47
	2,33	3,84	3,78			3,77

Fuente: Elaboración propia

7.2. Balance de agua

De acuerdo con el diagrama de las líneas de flujo, se estableció el siguiente balance de agua para la planta de producción de cemento:

Tabla 6. Balance de agua

Concesiones	Q concesión (l/s)	Q anual (m ³ /año)	Vertimientos (m ³ /año)	Pérdidas* (m ³ /año)
Agua doméstica (La Viuda)	2,30	72.532,80	26.922,03	45.610,77
Agua Industrial	14,95	471.463,20	159.572,16	311.891,04
Quebrada campamento	0,43	13.560,48	0,00	13.560,48
Torres acondicionadora	7,00	220.752,00	0,00	220.752,00
Autogeneración	22,20	700.099,20	20.612,10	679.487,10
Total	46,88	1478.407,68	207.106,29	1271.301,39

Fuente: Elaboración propia

* Pérdidas: corresponde al agua no contabilizada, agua evaporada y agua consumida que no retorna

A partir de dicho balance, se realizan las diferentes estimaciones de los colores de la huella hídrica.

7.3. Huella hídrica

En la tabla se presenta un resumen de la información resultante para cada uno de los procesos en las diferentes huellas.

Tabla 7. Componentes de la huella hídrica de los procesos y totales

Proceso	Huella hídrica	Componentes del proceso	Total huella (m ³ /año)
Cantera	Azul	Consumo agua riego	8.903,59
		Consumo agua doméstica taller	2.917,50
	Verde	Porcentaje humedad materiales extraídos (caliza, esquito y arcilla)	66.046,59
	Gris	Vertimientos industriales	0,00
		Vertimientos domésticos	204,76
Cemento	Azul	Consumo agua industrial	765.592,94
		Consumo agua doméstica áreas productivas	16.664,75
		Huella hídrica energía comprada	3417.110,20
	verde	Toneladas consumidas y porcentaje humedad materias primas	11.114,36
	Gris	Vertimientos industriales	72.339,38
		Vertimientos domésticos	233,33
Autogeneración	Azul	Consumo agua proceso industrial	472.971,78
		Consumo de agua doméstica	939,27
	Verde	Toneladas consumidas y porcentaje humedad carbón	6.268,06
	Gris	Vertimientos industriales	0
		Vertimientos domésticos	0
Auxiliares	Azul	Consumo de agua doméstica	29.364,37
	Verde	No aplica	No aplica

Proceso	Huella hídrica	Componentes del proceso	Total huella (m ³ /año)
	Gris	Vertimientos domésticos	2.762,86

Fuente: Elaboración propia

7.3.1. Huella hídrica azul

Partiendo del balance hídrico y los porcentajes de pérdida calculados, se obtiene el uso consuntivo de cada proceso. Para el caso de las aguas de uso doméstico el factor de retorno es del 37%, para las aguas industriales del proceso de cemento del 34% y para las de autogeneración del 3%. Este último, debido a las pérdidas en la torre de enfriamiento.

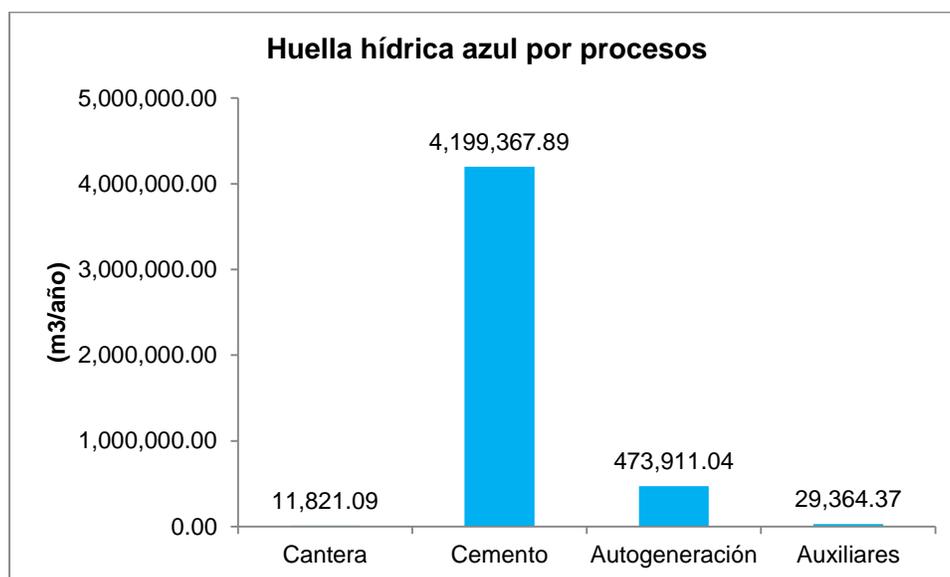


Figura 6. Huella hídrica azul de los procesos

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6 se presentan el comportamiento de la huella hídrica azul para cada uno de los procesos durante el año 2013, teniendo una mayor huella hídrica para el proceso de cemento, con un porcentaje de participación respecto al total del 89,07%. En dicho indicador el principal contribuyente es la energía comprada (3417.110,20 m³/año), seguida del consumo de agua industrial (765.592,94 m³/año) y el restante por las aguas de uso doméstico. El primero, depende de los valores facturados por compra de energía y la huella hídrica de generación de energía hidroeléctrica y la capacidad de autogeneración interna, pues resultaría menos impactante, en términos de huella hídrica, el consumo de energía termoeléctrica a partir de carbón.

El proceso de cemento es seguido por la generación de energía, con una huella hídrica azul de 472.971,78 m³/año y como aportantes menores al indicador de huella hídrica los procesos auxiliares y la cantera. Al enfatizar en los anteriores resultados, se tiene que el porcentaje de agua no contabilizada es un factor importante, pues representa más del 60% de las pérdidas del sistema de agua potable.

7.3.2. Huella hídrica verde

La extracción de materias primas naturales al interior de las minas propias posee la mayor huella hídrica verde, debido a que la arcilla tiene un consumo mucho mas bajo, comparado

con la caliza y contiene aproximadamente un 15% de humedad. Para el caso de la caliza, con una humedad promedio relativamente baja (2%), es el mineral de mayor consumo para el proceso, con un valor cercano a 1.700.000 ton/año.

Para autogeneración y cemento, la diferencia radica en las materias primas auxiliares de la producción de clinker y cemento, pues la huella verde del consumo de carbón para ambas son similares (6.200m³/año).

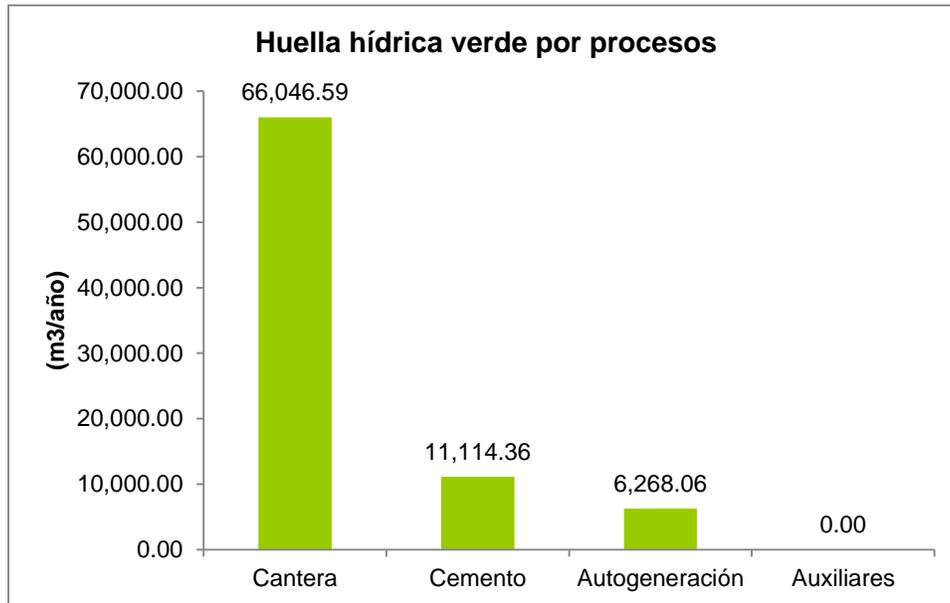


Figura 7. Huella hídrica verde de los procesos
Fuente: Elaboración propia

7.3.3. Huella hídrica gris

En la Figura 8 se presenta el comportamiento para la huella hídrica gris de los procesos, revelando que el aporte más importante es la huella correspondiente a las descargas de las aguas residuales industriales del enfriamiento de equipos. Esta misma consideración se tiene para Autogeneración. Es común para todos los procesos que el agua de los vertimientos domésticos es considerablemente baja en comparación con las aguas industriales.

Finalmente para el cálculo decide excluirse los valores estimados para los que las concentraciones son menores en relación con la concentración real, sumada a que todos los efluentes son menores que las abstracciones, dando como resultado una huella hídrica negativa, la cual no se debe incluir en el cómputo.

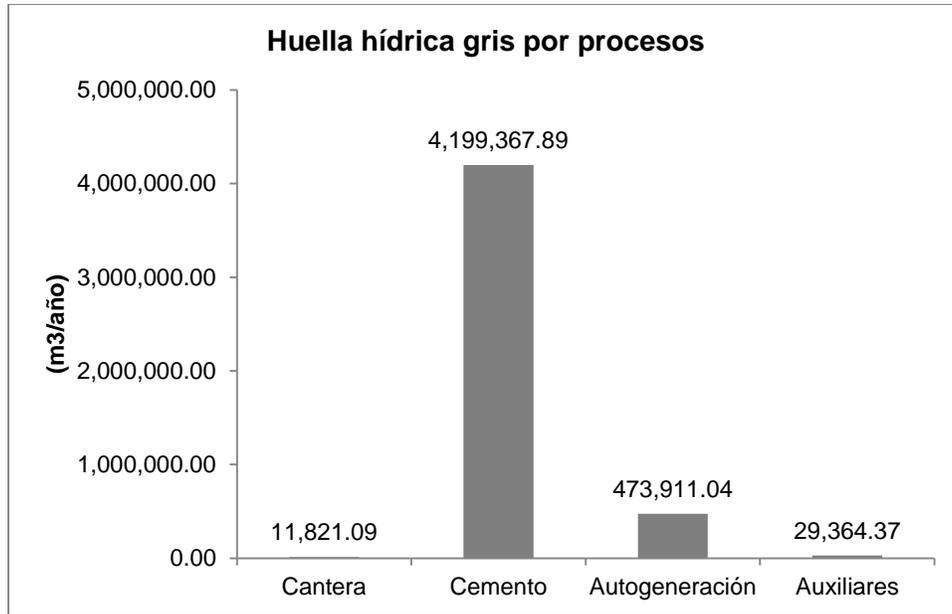


Figura 8. Huella hídrica gris de los procesos
Fuente: Elaboración propia

7.3.4. Huella hídrica Total

Una vez se realiza la acumulación de los diferentes colores de la huella hídrica, se revela que la huella hídrica azul es la más relevante con el 96,74% del total, seguida por la verde con el 1,71% y la gris con el 1,55%. Así mismo, se tiene una huella hídrica por tonelada de producto de 3,39 m³/ton para el año de estudio.

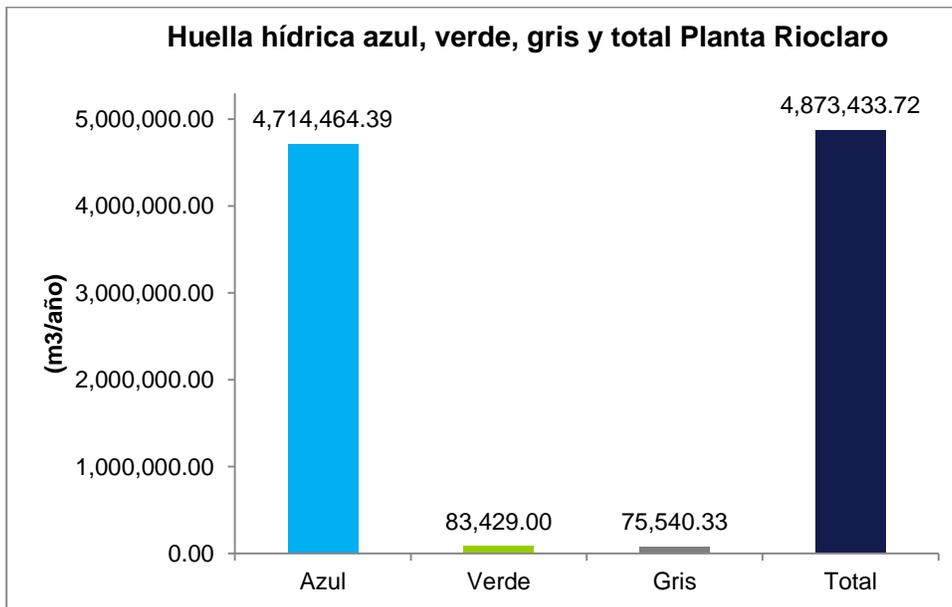


Figura 9. Huella hídrica total de los procesos
Fuente: Elaboración propia

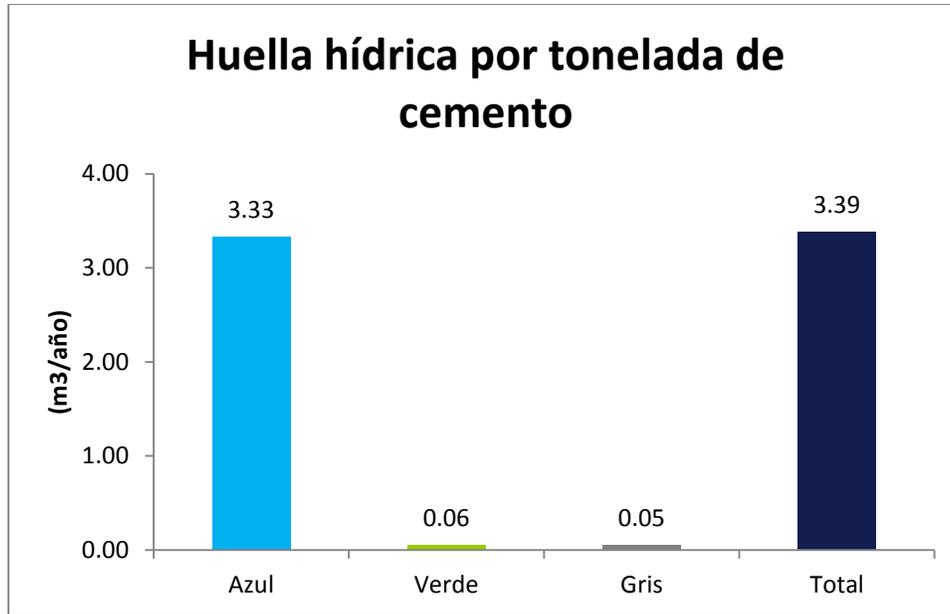


Figura 10. Huella hídrica por tonelada de cemento
Fuente: Elaboración propia

7.4. Evaluación de impactos

De acuerdo con la matriz de aspectos ambientales de la planta Rioclaro, se extraen los impactos ambientales potenciales sobre el componente ambiental agua, identificados como significativos (moderados, severos y críticos) relacionados con los impactos al agua y se llevan a una tabla de consolidación que permiten la priorización y análisis correspondiente de los resultados, resumidos en la Tabla 8.

Tabla 8. Impactos ambientales potenciales sobre el componente agua

Impacto ambiental	Relevancia del impacto
Alteración de la hidráulica de las aguas subterráneas	Moderado
Alteración de la hidráulica de las aguas superficiales	Moderado
Alteración de las propiedades del agua	Moderado
Colmatación en los cuerpos de agua	Moderado
Modificación del régimen natural de caudales	Moderado
Recurso hidrobiológico	Severo

Fuente: Matriz de aspectos e impactos ambientales. Cementos Argos

En relación a las aguas subterráneas, la actividad actual no evidencia que se hayan presentado cambios significativos, dadas las características hidrogeológicas originales. De igual manera se debe identificar la potencial modificación de la permeabilidad original del macizo por las vibraciones y el aporte de sedimentos y compactación del mismo, asociado a la operación minera. Se espera que se mantengan las condiciones actuales en cuanto a las aguas de escorrentía, infiltración y demás procesos hidráulicos asociados a las aguas subterráneas.

La principal afectación a la hidráulica de las corrientes superficiales en el área de las actividades, es la que genera la intervención tanto por el diseño artificial de la red de drenaje como por las actividades de remoción de la cobertura vegetal y de suelo. Se estima que esta situación se mantendrá constante en las áreas intervenidas y que con el tiempo, podrá reducirse con la implementación de las medidas de manejo para el cierre.

Las condiciones en cuanto a la calidad de las corrientes superficiales tienden a mantenerse con niveles de calidad similar, debido a que el aporte de cargas contaminantes por arrastre de sedimentos y vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales se estiman constantes y controladas por los sistemas de tratamiento existentes. Igualmente, las condiciones actuales de regímenes naturales de caudales se mantienen, ya que los procesos de escorrentía, infiltración, entre otros, no sufren cambios significativos. En cuanto a la utilización del recurso por captaciones de agua superficial, se mantiene constante.

En general, los cuerpos de agua evaluados presentan características favorables para el establecimiento de las diferentes comunidades hidrobiológicas. Sin embargo, el arrastre de sedimentos proveniente de los diferentes frentes de explotación de las minas, procesos erosivos y arrastre de otro tipo de sedimentos por medio de las aguas de escorrentía, son unos de los principales aspectos que afectan la calidad físico-química del agua, y algunos atributos relacionados con la composición de las comunidades hidrobiológicas. Este aspecto puede tener mayor incidencia en el Río Claro.

7.5. Sostenibilidad de la huella hídrica

La sostenibilidad en sus tres dimensiones: ambiental, social y económica, resulta muy compleja de evaluar por la cantidad de factores y actores involucrados, además de la imperiosa necesidad de equilibrio entre cada uno de ellas. Sin perder de vista el objetivo principal, cálculo de los colores de la huella hídrica para los diferentes procesos de producción de cemento, el análisis se enfoca en los índices de escasez y los *hotspots*.

Se identifica el área de estudio como un *hotspot* de biodiversidad, el cual juega un papel primordial a la hora de evaluar la sostenibilidad ambiental del recurso hídrico, pues si bien las características como calidad, escasez, disponibilidad y consumo son importante determinarlas y controlarlas, éstas tendrán repercusiones directas sobre la biodiversidad asociada a la zona, y una perturbación o alteración significativa de alguna de ellas puede resultar en la insostenibilidad de la huella hídrica.

Aplicando la metodología de la WFN, se hallan los indicadores de escasez del agua azul y verde, teniendo como resultado 4,98% y 0,09%, respectivamente, considerando la disponibilidad total como el caudal más crítico obtenido en la serie de caudales mínimos de la cuenca para un periodo de retorno de 100 años y las huellas hídricas totales descritas anteriormente. Con esto quedaría evaluada la condición más desfavorable de la sostenibilidad del recurso. No se evalúa el nivel de contaminación del agua, dado que este puede resultar alejado de la realidad, en respuesta a la falta de regulación nacional o local sobre el tema.

Aunque los indicadores de escasez son bajos, se plantean medidas que apunten a la eficiencia operativa por medio de la reducción del consumo de los módulos de agua en los diferentes procesos evaluados, por medio de la disminución del IANC, campañas de

detección y corrección de fugas y sistemas de recirculación cerrados, además de la inversión en tecnologías más eficientes en cada proceso, e igualmente la ecoeficiencia, hacer más con menos, lo cual generará sinergias a nivel local, empresarial y disminuirá la huella hídrica, teniendo como resultado una mejor gestión del recurso.

Los riesgos empresariales a los que se expone la industria cementera en la zona estudiada, pueden estar más ligados a los riesgos regulatorios, relacionado con una posible declaración de áreas de conservación, protección u otro régimen especial que pueda limitar el uso de los recursos o la continuidad de las operaciones. Lo anterior, desde la perspectiva de los entes gubernamentales, presenta un desafío importante para la ordenanza de la zona de modo que se armonicen las actividades que allí confluyen.

El desarrollo de una política que integre de manera sostenible el uso del recurso hídrico, que convoque a los diferentes sectores presentes en una cuenca determinada, debe estar inmersa en una participación equitativa e igual de cada uno de los actores, a los cuales no solo se les debe ordenar sino también invitar a que sean reales agentes participativos y de cambio. Dicha política debe estar encabezada por los hacedores de políticas nacionales, regionales y locales, que tendrá por objeto controlar el uso de los recursos naturales y la calidad del ambiente, las cuales integran un conjunto de principios, criterios y orientaciones generales, formulados de forma estratégica, para la protección del medio ambiente, el mejoramiento de las condiciones ambientales, y en algunos casos, de manera específica, dar respuesta a problemas ambientales prioritarios, lo cual se debe materializar en la sostenibilidad de los recursos y calidad de vida

8. CONCLUSIONES

La metodología desarrollada por la WFN sirve como marco de referencia para la evaluación de la huella hídrica de un proceso, que le permite a las organizaciones estimar los diferentes usos del recurso hídrico y las implicaciones a nivel de riesgo, calidad, disponibilidad y escasez en una zona geográfica determinada, pero a la vez presenta deficiencias en cuanto a la precisión de las variables a considerar.

Partiendo de que la hipótesis del estudio considera que es importante distinguir las subcategorías de la huella hídrica en la evaluación de este indicador ambiental, se ha demostrado que el detallarlas y especificarlas para los diferentes procesos es conveniente, pues ayuda a identificar los diferentes flujos de agua y hostposts, a centrar esfuerzos en la huella que representa mayores riesgos e identificar oportunidades de mejora más concretas.

La huella hídrica azul es la huella más significativa en el proceso de cemento, afectada principalmente por la huella de la energía comprada. Este mismo indicador para la cantera, fue el más bajo de los diferentes procesos, lo que evidencia que el consumo de los procesos auxiliares es representativo y se debe considerar en los análisis de huella hídrica.

El agua verde, aunque menor en comparación con el agua azul, denota importancia no solo por el gasto de agua que representa, sino también por las repercusiones que puede tener en la alteración del ciclo hidrológico. Esto se materializa más en la zona de canteras, donde el retiro de cobertura vegetal influye en la regulación natural de caudales, la recarga de acuíferos y la escorrentía superficial.

La huella hídrica verde puede resultar relevante para el análisis en la industria, que si bien comparada con la agricultura puede resultar insignificante, confrontada con el sector cementero puede llegar a ser importante, en relación al uso de materias primas naturales y su humedad intrínseca.

La huella hídrica gris se ve afectada principalmente por las aguas residuales industriales, las cuales pueden verse mejoradas con la implementación de sistemas de recirculación y enfriamiento. Para el cálculo de esta huella es fundamental contar con normas y objetivos de calidad locales, que permitan hacer un análisis real de las necesidades y condiciones del área y proceso evaluado.

La zona estudiada presenta una alta disponibilidad de agua, lo que la cataloga como un área de abundancia, lo cual fue validado por medio de dos métodos complementarios. Ahora bien, es necesario establecer medidas de control para no exceder las condiciones óptimas de regímenes de flujo, sobre todo en eventos extremos y épocas de estiaje.

De acuerdo con el balance de agua, las pérdidas del sistema son significativas debidas a factores operacionales para el índice de agua no contabilizada y por evaporación para el proceso de autogeneración.

Realizar el análisis del nivel de estrés hídrico donde se ubican las operaciones, es fundamental como punto de partida del análisis de la huella hídrica, puesto que amplía el panorama sobre el área circundante e identifica *hotspots*. Para el caso de la planta de cemento Rioclaro, se identificó un *hotspot* de biodiversidad, el cual puede resultar interesante desde el punto de análisis de riesgos y la gestión sobre el mismo.

Los impactos identificados respecto al componente agua, en su mayoría arrojaron que la relevancia del impacto es moderado, pero si estos se asocian al *hotspot* de biodiversidad se tiene una relevancia severa sobre el recurso hidrobiológico.

La sostenibilidad de la huella hídrica, evaluada por medio de los indicadores de escasez de agua azul y verde, permite concluir que la huella hídrica de los procesos de producción de cemento en la planta Rioclaro, son sostenibles.

Esta primera aproximación es de un nivel exploratorio, debido a la poca investigación sobre el tema objeto de estudio y las limitaciones metodológicas en cuanto al desarrollo de un estándar, que pretende establecer un punto de partida para investigaciones futuras y abrir, mejorar e implementar la evaluación de la huella hídrica. En este sentido, se sugieren nuevas investigaciones que permitan precisar la estimación de la huella hídrica gris, la relevancia de la huella hídrica verde y la evaluación de los impactos asociados al uso del agua.

9. RECOMENDACIONES

Cada vez que se desee realizar el análisis de estrés hídrico sobre una determinada zona, es recomendable llevar la información a nivel local, con el fin de contrastar y validar la oferta y demanda de agua específica, además poder determinar variables que pueden resultar importantes, que con solo una mirada global, se desatenderían.

Es aconsejable realizar la distinción de las categorías de la huella hídrica para la industria, ya que permite identificar fácilmente los puntos críticos y con base en estos tomar acciones más precisas que ayuden a mitigar o controlar sus efectos.

Atacar las pérdidas por agua no contabilizada por medio de campañas de detección y corrección de fugas, debido a que representan un factor que contribuye considerablemente en el análisis de la huella hídrica azul. Igualmente, adelantar acciones que contribuyan a disminuir este indicador a niveles más aceptables por la normatividad.

Dado que la energía es el factor determinante de la huella hídrica azul, las acciones conducentes a la eficiencia operativa en el proceso de producción de cemento deben enfocarse en la reducción de consumo de este insumo, por medio del aumento de los factores de marcha y eficiencia de los equipos, sumado a una posible renovación tecnológica. Igualmente, para el caso de las aguas industriales, relacionadas con el enfriamiento de equipos, se considera prudente la implementación de una torre de enfriamiento con la cual se recuperaría un alto volumen de agua actualmente vertida.

El agua verde debe ser incluida en los análisis de las industrias que contemplen el uso de materias primas naturales, debido a los efectos de consumo de agua y la consecuente afectación de la disponibilidad del recurso.

Es necesario profundizar más en la determinación de la huella hídrica gris, ya que su complejidad y subjetividad pueden dar estimativos errados, si no es claro su procedencia y efectos en las descargas, debido a que se puede prestar para diversas interpretaciones. Adicionalmente, se debe complementar con modelos de calidad de agua que permitan determinar la verdadera capacidad de asimilación de las descargas. Sumado a esto, cada usuario puede elegir los parámetros que considere relevantes, pues incluirlos todos redundaría en un absurdo.

Puesto que la industria del cemento creó su propio manual para el reporte del agua, se considera se puede ahondar en este a tal nivel que se homologuen los criterios a considerar en la escogencia de información y parámetros relevantes. Igualmente, se debe incluir lo relacionado con las aguas residuales domésticas, a las cuales no es ajeno ningún proceso.

Sabiendo que se identifica un *hotspot* de biodiversidad y una vez evaluados los impactos sobre el recurso hídrico, el impacto ambiental sobre el recurso hidrobiológico resulta severo, por lo que es necesario tomar medidas inmediatas para esta variable medio ambiental, no solo por las industrias y pobladores asentados en la zona si no por entes reguladores.

Para tener información más concluyente sobre los reales impactos, se deben adelantar estudios más detallados para los diferentes componentes medio ambientales, como es la alteración de las propiedades del agua superficial y subterránea por medio del establecimiento de una red de monitoreo hidrológica, la cual se mantenga en el tiempo.

Realizar la planificación estratégica de los diferentes impactos asociados al recurso hídrico, de modo que se disminuyan los diferentes riesgos asociados sobre el mismo, teniendo presente que no es una tarea exclusiva de la actividad industrial, sino que involucra los diferentes actores presentes en la zona.

Promover el desarrollo de políticas públicas nacionales y locales relacionadas con la determinación de objetivos de calidad que ayuden a mejorar la interpretación de los reales

efectos sobre el agua, además de la construcción y desarrollo de software que mejore no solo el ordenamiento del recurso sino su comprensión, a fin de poder profundizar en los diferentes análisis.

Para futuras investigaciones se considera prudente involucrar en el análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica, el indicador del nivel de contaminación y otros riesgos como la susceptibilidad a las alteraciones del clima (cambio climático), pues pueden ser relevantes e introducir otros riesgos que en esta oportunidad no fueron contemplados.

Seguir profundizando en los componentes y determinantes del cálculo de la huella hídrica, además de mejorar las herramientas de cálculo y si es posible pensar en la homologación de términos y una metodología, al menos sectorial, que no solo defina los lineamientos del reporte sino que también permita poder equiparar los resultados.

REFERENCIAS

- Abdi, M. A. & Namin, S. M. (2008). Spatial planning as an approach to achieve sustainable development in historic cities. *Proceedings of world academy of science, engineering and technology*. 36, 215-220.
- Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación –COSUDE–. (2013). *Proyecto Piloto SuizAgua Colombia* (pp. 1–22). Disponible en: <http://www.suizaguacolombia.net/>
- Allan, J.A. (1993). Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible. *Priorities for water resources allocation and management*, ODA, London, pp 13–26
- Arango, J. (2013). *Determinación de la huella hídrica del sector doméstico en la cuenca del Río Porce*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Arango, J., Martínez, V. A., y Ríos, J. A. (2013). Determinación de la Huella Hídrica del Sector Doméstico en la Cuenca del río Porce, 51–78.
- Arévalo, D. (2012). *Una mirada a la agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica*. WWF (pp. 1–48). Cali, Colombia. Disponible en: <http://www.huellahidrica.org/Reports/Arevalo-2012-HuellaHidricaColombia.pdf>
- Arévalo, D., Lozano, J.G., y Sabogal, J. (2011) Estudio Nacional de Huella Hídrica Colombia Sector Agrícola. *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, (7), 101-126. Cátedra UNESCO de Sostenibilidad, Universidad Politécnica de Cataluña, España
- Boulay, A.M., Bulle, C. C., Bayart, J.B., Deschênes, L., & Margni, M. (2011). Regional characterization of freshwater use in LCA: modeling direct impacts on human health. *Environmental Science & Technology*. 45, 8948–8957.
- Brito, O. A. (2011). Diagnóstico de implementación de metodología de cálculo de la huella de agua y huella de carbono en empresa DSM. Universidad Austral de Chile.
- Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia –CTA–. (2013). *Resumen de resultados. Evaluación de la huella hídrica en la cuenca del río Porce. Mayo 2013* (pp. 1–102). Disponible en <http://www.wwf.org.co/?208627/Resultados-del-proyecto-de-Huella-Hidrica-en-el-Porce>
- Cementos Argos (2014). Plan de gestión del riesgo y manejo de vertimientos.
- (2012). Estudio de impacto ambiental para la modificación del plan de manejo ambiental de los títulos mineros 4410 al 4413.
- (2014). Actualización del plan de uso eficiente y ahorro del agua
- Cemex. (2012). Informe de desarrollo sustentable 2012. Construyendo las ciudades del futuro (pp. 1–73). Disponible en: <http://www.cemex.com>

- Chenoweth, J., Hadjikakou, M., & Zoumides, C. (2013). Review article: Quantifying the human impact on water resources: a critical review of the water footprint concept. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(7), 9389–9433.
- Civit, B., Arena, P., Curadelli, S., y Piastrellini, R. (2012). Indicadores de sostenibilidad. Huella de carbono y huella hídrica de un viñedo considerando distintos sistemas de riego en Mendoza, Argentina. *Enoviticultura*, (14), 2–9.
- Conesa V. (2010). Guía metodológica para la evaluación de impacto ambiental. España: Mundi-Prensa Libros, S.A.
- Ercin, A. E., & Hoekstra, A. Y. (2012). *Carbon and Water Footprints: Concepts, methodologies and policy responses* (No. 04) (pp. 1–24). Paris.
- EPA. (2009). *National Primary Drinking Water Regulations*. Disponible en <http://water.epa.gov/drink/contaminants/upload/mcl-2.pdf>
- Fundación MAPFRE. (2011). Huella hídrica, desarrollo y sostenibilidad en España (pp. 1–425). Madrid. Disponible en: <http://www.huellahidrica.org/Reports/FundacionMapfre-2011-huella-hidrica-y-desarrollo-sostenible.pdf>
- Frischknecht, R., Steiner, R., & Jungbluth, N. (2009). The Ecological Scarcity Method e Eco-Factors 2006. A Method for Impact Assessment in LCA. Federal Office for the Environment, Bern.
- Galli, A., Wiedmann, T., Ercin, E., Knoblauch, D., Ewing, B., & Giljum, S. (2012). Integrating Ecological, Carbon and Water footprint into a “Footprint Family” of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet. *Ecological Indicators*, 16, 100–112. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1470160X11001889>
- González, J. E., Montoya, L. J., Botero, B. A., Arévalo, D., y Valencia, V. (2012). Aproximación a la estimación de la Huella Hidrica de la minería del oro en el municipio de Segovia, Antioquia (Colombia). *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología Y Humanismo*, Diciembre (7), 27–44. Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/revistes/handle/2099/13291>
- Hoekstra, A. Y. (2009). Human appropriation of natural capital: a comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics*, 68(7), 1963–1974
- Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2007). Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 21(1), 35–48. Disponible en: <http://link.springer.com/journal/11269>
- (2008). *Globalization of Water: Sharing the Planet’s Freshwater Resources*. Oxford, UK, Blackwell Publishing (pp. 1–224)
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard* (pp. 1–228). Londres: Earthscan. Retrieved from <http://www.waterfootprint.org/?page=files/Publications>

- Hoekstra, A. Y., & Hung, P. Q. (2002). *Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade*.
- Hoekstra, A. Y. & Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (9), 3232–3237
- Ihobe. (2009). *Análisis de ciclo de vida y huella de carbono. Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto*. (Ihobe, Ed.) (pp. 1–43). Bilbao.
- International Organization for Standardization –ISO–. (2014). ISO 14046. Environmental management Water footprint - Principles, requirements and guidelines. Suiza.
- Jeswani, H. K., & Azapagic, A. (2011). Water footprint: methodologies and a case study for assessing the impacts of water use. *Journal of Cleaner Production*, 19(12), 1288–1299. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S0959652611001193>
- Mihăiescu, T., Mihăiescu, R., & Odagiu, A. (2012). Water footprint - a useful concept in integrated water resources management. *ProEnvironment*, 5, 270–273.
- Milà i Canals, L., Chenoweth, J., Chapagain, A., Orr, S., Antón, A., & Clift, R. (2009). Assessing freshwater use impacts in LCA: Part I – Inventory modelling and characterisation factors for the main impact pathways. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 14 (1), 28–42.
- Pfister, S., Koehler, A., & Hellweg, S. (2009). Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. *Environmental Science & Technology*, 43(11), 4098–4104. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19569336>
- Ridoutt, B.G., & Pfister S. (2010). A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity. *Global Environmental Change*, 20 (1), 113-120.
- Schneider, H. (2009). *La huella del carbono en la producción , distribución y consumo de bienes y servicios* (pp. 1–46). Santiago de Chile. Disponible en: www.cepal.org/publicaciones/xml/5/38285/lcw.298_2.pdf
- United Nations Environment Programme –UNEP–, & Korea International Cooperation Agency –KOICA–. (2010). *Water Footprint and Corporate Water Accounting for Resource Efficiency* (pp. 1–179). Disponible en: <http://www.waterfootprint.org/Reports/UNEP-2011.pdf>
- Wackernagel, M., & Rees, W. (2013). *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth* (p. 160). Philadelphia: New Society Publishers.
- World Business Council for Sustainable Development –WBCSD– (n.d.). Sitio web <http://www.wbcsd.org/work-program/sector-projects/water/global-water-tool.aspx>

—(2014). *Protocolo para reporte agua. Iniciativa para la sostenibilidad del cemento* (pp.1–11).

WULCA (n.d.). Sitio web. <http://www.wulca-waterlca.org/footprinting.html>

World Wide Fund for Nature –WWF–. (2010). *Planeta Vivo Informe 2010. Biodiversidad, Biocapacidad y Desarrollo.* (pp. 1–110). Disponible en: http://awsassets.panda.org/downloads/informe_planeta_vivo_2010.pdf