



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Cuantificación y análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica agrícola y pecuaria de la cuenca del río Porce**

**Edwin David Builes Cedula**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente  
Medellín, Colombia  
2013

# **Cuantificación y análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica agrícola y pecuaria de la cuenca del río Porce**

**Edwin David Builes Cedula**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo**

Director:

Conrado Tobón Marín Ph.D.

Grupo de Investigación:

Hidrología y Modelación de Ecosistemas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente

Medellín, Colombia

2013

*(Dedicatoria)*

*A Dios y a la Virgen sobre todas las cosas, a mi familia especialmente mis padres Nacira y Diego por el incondicional apoyo, a mi hermano Cristian por su cariño, a Karen por su infinito amor.*

*Tú debes ser el cambio que deseas ver en el mundo.*

## **Agradecimientos**

El autor manifiesta su agradecimiento a el Profesor Conrado Tobón, por sus acertados comentarios y guía en el proceso investigativo. A la Dra. Claudia Campuzano y al Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia por su gestión y apoyo a esta investigación. A Diego Arévalo por su asesoría técnica. A todo el equipo técnico del proyecto “Huella Hídrica Cuenca del Porce” especialmente a los Ingenieros (as) Sergio Moreno, Carolina Rodríguez y Natalia Cardona. A los profesores Juan Camilo Villegas y María del Pilar Arroyave por sus sugerencias. A mis amigos Jorge Andrés, Ricardo Esteban, Juan Luis, Andrés Felipe y Jorge Mario por ser lo que son. Y a todos los que estuvieron a mi lado en el camino hacia el conocimiento, Gracias.

## Resumen

Este estudio cuantifica la huella hídrica azul, verde y gris de las actividades agrícolas y pecuarias de un área geográficamente delimitada de manera explícita, específicamente en la cuenca del río Porce, centro occidente de Colombia. La huella hídrica agrícola total de la cuenca del río Porce es de aproximadamente 250 Mm<sup>3</sup>/año, para el periodo de 2005-2010, 93% HH verde, 5% HH azul y 2% HH gris. El café es el cultivo que más aporta a la huella hídrica de consumo con un 31%, seguido por la caña, papa y plátano con valores del 19, 15 y 8 % respectivamente. Por otro lado, la huella hídrica pecuaria de la cuenca del río Porce es de aproximadamente 698 Mm<sup>3</sup>/año, de los cuales el 66% (464 Mm<sup>3</sup>/año) es verde, el 32% (221 Mm<sup>3</sup>/año) gris y sólo el 2% (12 Mm<sup>3</sup>/año) restante azul. Los bovinos son la especie que más contribuye a la huella hídrica total pecuaria de la cuenca (más del 80%), seguido por los equinos, aves y porcinos respectivamente. Se identificaron posibles *hotspots*, los cuales se definen como aquellos sitios o periodos de tiempo en los cuales la huella hídrica excede la disponibilidad de agua en la cuenca. Finalmente, se propone la huella hídrica como indicador para la toma de decisiones en la ordenación y gestión del agua por parte de diferentes entidades competentes, y se formularon lineamientos de manejo para la gestión integral del recurso hídrico en la cuenca.

**Palabras clave:** Huella hídrica, Uso del agua, Gestión del recurso hídrico, Agua virtual, Cuenca del Porce, Actividades agropecuarias.

## Abstract

This study quantifies the blue, green and gray water footprint, of the agricultural and livestock activities of a geographically defined area, specifically Porce River Basin, west central Colombia. The total agricultural water footprint (WF) of Porce river basin is about 250 Mm<sup>3</sup>, for the period 2005-2010. 93% WF green, 5% WF blue and 2% WF gray. The coffee crop is the largest contributor to the water footprint 31% of the total amount, followed by sugarcane, potato and plaitain with values of 19, 15 and 8% respectively. On the other hand, the water footprint of livestock Porce River Basin is approximately 698 Mm<sup>3</sup>, which 66% (464 Mm<sup>3</sup>) is green, 32% gray (221 Mm<sup>3</sup>) and only 2% remaining (12 Mm<sup>3</sup>) blue. Cattle are the species that contributes most to the total water footprint of the basin livestock (over 80%), followed by horses, poultry and pigs respectively. We identified potential *hotspots*, which are defined as those sites or time periods in which the water footprint exceeds water availability. Finally, the water footprint is proposed as an indicator for decision-making in the planning and management of water by different entities, and management guidelines were developed for the integrated management of water resources in the basin.

**Keywords:** Water Footprint, Water use, Water resource management, Virtual water Porce Basin, Agricultural activities.

# Contenido

	Pág.
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Marco teórico</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Área de estudio</b> .....	<b>10</b>
2.1.1 Vegetación.....	11
2.1.2 Suelos .....	12
2.2 Clima.....	13
<b>3. Metodología</b> .....	<b>14</b>
3.1 Huella hídrica agrícola.....	14
3.1.1 Requerimiento de agua azul y verde de los cultivos (CWU <sub>verde</sub> y CWU <sub>azul</sub> ) .....	15
3.1.2 Agua virtual, huella hídrica azul y verde agrícola .....	19
3.1.3 Agua virtual y huella hídrica gris agrícola.....	19
3.2 Huella hídrica pecuaria.....	20
3.2.1 Huella hídrica del alimento.....	20
3.2.2 Huella hídrica del consumo.....	22
3.2.3 Huella hídrica de la servidumbre.....	23
3.2.4 Cálculo de la huella hídrica gris del sector pecuario .....	23
3.2.5 Determinación del número de animales por municipio en la cuenca del río Porce 24	
3.3 Metodología aplicada para el análisis de sostenibilidad ambiental en la cuenca del río Porce .....	24
3.3.1 Análisis ambiental de la huella hídrica azul.....	26
3.3.2 Análisis ambiental de la huella hídrica verde .....	27
3.3.3 Análisis ambiental de la huella hídrica gris.....	29
3.4 Metodología usada para la modelación hidrológica distribuida en la cuenca río Porce .....	30
3.4.1 Construcción de los mapas de entrada.....	30
3.4.2 Recolección de la información climatológica.....	31
3.4.3 Calibración.....	31
3.4.4 Validación .....	33
<b>4. Resultados</b> .....	<b>34</b>
4.1.1 Simulación.....	34
4.2 Huella hídrica agrícola en la cuenca del río Porce.....	34
4.2.1 La huella hídrica agrícola por tonelada .....	38
4.2.2 Huella hídrica agrícola a escala mensual.....	38
4.3 Huella hídrica pecuaria en la cuenca del río Porce.....	40

4.3.1	Huella hídrica pecuaria por tonelada .....	44
4.3.2	Huella hídrica pecuaria mensual .....	45
4.4	Análisis de sostenibilidad ambiental.....	46
4.4.1	Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica verde .....	46
4.4.2	Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica azul.....	50
4.4.3	Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica gris .....	51
<b>5.</b>	<b>Discusión.....</b>	<b>52</b>
<b>6.</b>	<b>Lineamientos de manejo .....</b>	<b>59</b>
<b>7.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>61</b>

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 2-1. Área de estudio, localización general .....	11
Figura 3-1. División de la cuenca del río Porce en cuencas tramos y subcuencas .....	26
Figura 4-1. Caudales simulados para la cuenca del río Porce .....	34
Figura 4-2. Contribución de los diferentes cultivos a la huella hídrica de consumo (HH verde + HH azul). .....	35
Figura 4-3. Huella hídrica total agrícola anual (azul, verde y gris) en la cuenca del río Porce.....	37
Figura 4-4. Huella hídrica por tonelada o contenido de agua virtual (m <sup>3</sup> /ton) .....	38
Figura 4-5. Huella hídrica verde y azul mensual agrícola de la cuenca del río Porce .....	39
Figura 4-6. Huella hídrica gris mensual de la cuenca del río Porce .....	40
Figura 4-7. Distribución porcentual de la huella hídrica pecuaria en la cuenca del río Porce.....	40
Figura 4-8. Huella hídrica total pecuaria de bovinos, equinos, porcinos y aves .....	41
Figura 4-9. Distribución porcentual de la huella hídrica verde total en la cuenca del río Porce.....	42
Figura 4-10. Distribución porcentual de la huella hídrica azul total en la cuenca del río Porce.....	43
Figura 4-11. Distribución porcentual de la huella hídrica gris total en la cuenca del río Porce.....	44
Figura 4-12. Huella hídrica verde, azul y gris mensual pecuaria de la cuenca del río Porce .....	46
Figura 4-13. Comparación entre la huella hídrica verde mensual y la disponibilidad de agua verde mensual (DAV) actual. a: cuenca del río Aburrá, b: cuenca del río Grande, c: cuenca del río Porce medio, d: cuenca del río Guadalupe, e: cuenca del río Porce, f: cuenca del río Porce medio bajo, g: cuenca del río Porce. ....	49
Figura 4-14. Huella hídrica azul versus oferta de agua azul neta de la cuenca del río Porce.....	50
Figura 4-15. Huella hídrica gris versus oferta natural de la cuenca del río Porce.....	51
Figura 5-1. Comparación de los resultados de HH de consumo de la cuenca del río Porce con Mekonnen y Hoekstra (2010) y Siebert y Doll (2010).....	54

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1-1. Publicaciones de HH agrícola alrededor del mundo .....	7
Tabla 3-1. Cultivos presentes en la cuenca del río Porce.....	16
Tabla 3-2. Estaciones utilizadas en la modelación de la cuenca del río Porce .....	31
Tabla 3-3. Factores de corrección obtenidos del proceso de calibración.....	33
Tabla 4-1. Huella hídrica verde, azul y gris por tonelada (contenido de agua virtual) pecuario de la cuenca del río Porce .....	45
Tabla 5-1. Huella hídrica por tonelada estimada para la cuenca del río Porce y para Antioquia (Mekonnen y Hoekstra, 2010). .....	53

## Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviatura o símbolo	Término
HH	Huella hídrica
HH <sub>A</sub>	Huella hídrica azul
HH <sub>V</sub>	Huella hídrica verde
HH <sub>G</sub>	Huella hídrica gris
HH <sub>proc</sub>	Huella hídrica del proceso
HH <sub>proc, azul</sub>	Huella hídrica del proceso azul
HH <sub>proc, verde</sub>	Huella hídrica del proceso verde
HH <sub>proc, gris</sub>	Huella hídrica del proceso gris
CWU <sub>verde</sub>	Requerimiento de agua verde del cultivo (m <sup>3</sup> /ha)
CWU <sub>azul</sub>	Requerimiento de agua azul del cultivo (m <sup>3</sup> /ha)
Y	Rendimiento del cultivo (ton/ha)
K <sub>c</sub>	Coefficiente del cultivo
K <sub>s</sub>	Parámetro de balance de agua del suelo
K <sub>y</sub>	Coefficiente de rendimiento del cultivo
ADT	Agua disponible total en el suelo
CC	Capacidad de campo
PMP	Punto de marchites permanente
E	Evaporación
ET	Evapotranspiración
T	Temperatura
P	Precipitación
HR	Humedad relativa
R <sub>n</sub>	Radiación neta
VV	Velocidad del viento
R	Escorrentía
Q	Caudal
Q <sub>95</sub>	Caudal igualado o excedido el 95% del tiempo
K <sub>tr</sub>	Factor de frecuencia en función del periodo de retorno y de la función de distribución de probabilidades
S <sub>Q</sub>	Desviación estándar de la serie de caudales máximos mensuales
DEM	Modelo de elevación digital
RMSE	Error cuadrático medio
NSE	Coefficiente de eficiencia de Nash
E <sub>azul</sub>	Escasez de agua azul
E <sub>verde</sub>	Escasez de agua verde

<b>Abreviatura o símbolo</b>	<b>Término</b>
<i>NCA</i>	Nivel de contaminación del agua
<i>DAV</i>	Disponibilidad de agua verde
<i>OA</i>	Oferta de agua azul
<i>Req.Ms</i>	Requerimiento de materia seca
<i>Req.Total.FV</i>	Requerimiento total de forraje verde
<i>N</i>	Nitrógeno
<i>P</i>	Fosforo
<i>L</i>	Carga contaminante
<i>Cmax</i>	Carga contaminante máxima
<i>Cnat</i>	Concentración natural
<i>IDEAM</i>	Instituto de Hidrología y Estudios Ambientales
<i>IGAC</i>	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
<i>AEA</i>	Anuarios Estadísticos de Antioquia
<i>EPM</i>	Empresas Públicas de Medellín
<i>FAO</i>	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura
<i>Corantioquia</i>	Corporación Autónoma Regional para el Centro y Norte de Antioquia
<i>Cornare</i>	Corporación Autónoma Regional de los ríos Negro y Nare
<i>AMVA</i>	Área Metropolitana del Valle de Aburrá

---

## Introducción

A través de las actividades humanas se consume y contamina una gran cantidad de agua; con el aumento de la población mundial, se espera que estas se intensifiquen y que la demanda por agua continúe aumentando en las próximas décadas (Rosegrant y Rigler, 2000). En la actualidad, más de 800 millones de personas carecen de un suministro seguro de agua dulce y 2 millones de personas de saneamiento básico de agua (Falconer *et al.*, 2012). Colombia es uno de los 10 países con mayor disponibilidad de recurso hídrico en el mundo (WWF, 2012), sin embargo, el aumento de las actividades económicas y de la población lo ponen en riesgo, especialmente en ciertas regiones áridas y semiáridas, en las cuales se vienen presentando graves problemas, como la contaminación de aguas superficiales, la disminución en los caudales y el deterioro de las aguas subterráneas (IDEAM, 2010).

A escala global se ha encontrado que las actividades agrícolas y pecuarias son las que mayor consumo y contaminación de agua tienen asociado, aproximadamente el 85% del consumo mundial de agua dulce (Zeng *et al.*, 2012; Mekonnen y Hoekstra, 2010a). Por esta razón, es necesario la creación y uso de nuevas herramientas que permitan realizar mejor la planificación y el manejo de los recursos hídricos, que ayuden a mantener un balance entre su uso, por parte de los humanos, y la protección de los ecosistemas proveedores de los mismos (Zeng *et al.*, 2012; Dudgeon *et al.*, 2006).

El concepto "huella hídrica"(HH), introducido por Hoekstra (2003) y desarrollado posteriormente por Hoekstra y Chapagain (2008), surge en la comunidad científica con el objetivo de promover un uso del agua eficiente, equitativo y sostenible, y abrir nuevos caminos para la planificación y la gestión de los recursos hídricos (Falkenmark, 2003; Falkenmark y Rockstrom, 2006; Hoekstra y Chapagain, 2007; Liu y Savenije, 2008; Zeng *et al.*, 2012). La huella hídrica de un producto se define como el volumen total de agua dulce que se utiliza para producir dicho producto (Hoekstra *et al.*, 2009) y se divide en tres componentes: azul, verde y gris. La huella hídrica azul se refiere al volumen de agua

superficial y subterránea consumida (evaporada) en la producción de un bien o servicio; la huella hídrica verde se refiere al agua de lluvia o agua en el suelo consumida; la huella hídrica gris de un producto representa el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar la carga de contaminantes resultantes de la producción del mismo (Hoekstra, 2003).

Debido a lo novedoso del concepto y a la falta de información detallada a nivel de cuenca (cartografía, usos del suelo, niveles de producción, cuencas debidamente instrumentadas, entre otros), en la literatura se encuentran pocos estudios de HH a escala de cuenca hidrográfica (Zeng *et al.*, 2012). Se reportan únicamente los realizados por Samoral *et al* (2011), los cuales hallaron la huella hídrica extendida para la cuenca del río Guadalquivir en España; Aldaya y Llamas (2008), que analizaron el agua virtual y la HH desde el punto de vista hidrológico y económico en la parte española de la cuenca del Guadiana y Zeng *et al* (2012) que evaluaron la huella hídrica en la cuenca del río Heihe en China y su sostenibilidad ambiental a escala mensual. Lo anterior denota una falta de investigaciones y estudios que proporcionen información acerca de los consumos de agua por parte de las actividades humanas, dentro de las cuencas hidrográficas sobre las cuales se realiza la planeación y gestión de los recursos naturales.

En la cuenca del río Porce tienen lugar numerosas actividades humanas, las cuales, por una parte, demandan una alta cantidad de agua y por la otra, contribuyen, de manera directa, al deterioro gradual de los recursos naturales, especialmente del recurso hídrico. Lo anterior es generado, principalmente por las actividades agrícolas y pecuarias que han ocasionado contaminación del agua, debido a prácticas irracionales, ineficientes y descargas de aguas residuales sin tratamiento a las fuentes de agua.

Recientemente, se han realizado diferentes intentos de planificación ambiental del territorio, en relación con la oferta y demanda de los recursos agua y suelo; sin embargo, esto no permite llevar a cabo un adecuado análisis de lo que sucede realmente con el agua en una cuenca. Aspectos como la dependencia de las actividades productivas de fuentes externas, la exportación del recurso a otras cuencas y la cantidad de agua usada en la cuenca, no se han considerado en la cuantificación del agua que necesita una cuenca para su buen funcionamiento y sostenibilidad.

En este sentido, se ha propuesto la huella hídrica como mecanismo y herramienta para la gestión integrada del recurso hídrico y la planificación del territorio (Hoekstra, 2009), lo cual hace necesario realizar estudios de este tipo a escala de cuenca, ya que en ésta se encuentran diversos sistemas que funcionan conjuntamente, lo que la convierte en un espacio idóneo para la planificación de los recursos naturales. La evaluación de la HH a nivel de cuenca es un paso importante para comprender cómo las actividades humanas influyen en los ciclos naturales del agua y es una sólida base para la gestión integrada de los recursos y usos sostenibles del agua. Asimismo, y con el fin de determinar el tamaño de la huella hídrica resultante de las actividades humanas, se debe comparar la HH con la disponibilidad de recursos u oferta en la cuenca, es decir que tanta agua tiene la cuenca (oferta hídrica) para soportar las actividades agrícolas y pecuarias que en ella tienen lugar; a este análisis se le denomina análisis de sostenibilidad ambiental de huella hídrica (Hoekstra *et al.*, 2011).

Tomando en cuenta la problemática enunciada anteriormente, se hacen los siguientes interrogantes: ¿cuál es la magnitud de la huella hídrica azul, verde y gris para las actividades agrícolas y pecuarias en la cuenca del río Porce a escala mensual? y ¿es esta huella hídrica sostenible comparada con la oferta ambiental de la cuenca?

Esta investigación tiene como principales objetivos cuantificar la huella hídrica azul, verde y gris para los sectores agrícola y pecuario de la cuenca del río Porce y evaluar su sostenibilidad como clave para una mejor comprensión del consumo de agua a nivel de cuencas y la identificación de formas de mejorar la gestión del agua. Se calculó la huella hídrica azul, verde y gris para la cuenca del río Porce así como para 31 subcuencas ubicadas en la misma, a escala mensual y se compararon con la disponibilidad de agua, hallada usando un modelo hidrológico distribuido (TETIS), con el fin de identificar “Hotspots” ambientales, los cuales se definen como aquellos sitios o periodos de tiempo en los cuales la huella hídrica excede la disponibilidad de agua dentro de la cuenca o subcuencas y así evaluar su sostenibilidad. Para este estudio se escogió la cuenca del río Porce, centro occidente de Colombia, debido a que en ella tienen lugar intensas actividades agrícolas y pecuarias y se constituye como la principal proveedora de recursos para más de 4 millones de habitantes

# 1. Marco teórico

La huella hídrica (HH) es un indicador de apropiación humana del recurso hídrico para sustentar diversas actividades económicas, que busca, principalmente, ilustrar los vínculos existentes entre el uso del agua y la gestión de los recursos hídricos (Hoekstra, 2009).

El concepto se basa en la teoría de “agua virtual” desarrollada por Allan (1998), al estudiar la posibilidad de importar agua virtual (en lugar de agua real) como una solución parcial a los problemas de escasez de agua en el Oriente Medio. El agua que se consume en el proceso de producción de un producto agrícola o industrial se denomina “agua virtual” (Allan 1998). Si un país exporta un producto con un alto consumo de agua a otro país, exporta agua en forma virtual. De este modo, algunos países podrían apoyar a otros países en sus necesidades de agua. Para los países con escasez de agua podría ser atractivo disminuir presiones a su recurso hídrico mediante la importación de productos altamente demandantes de agua, en lugar de producirlos (Hoekstra, 2003).

Hoekstra y Chapagain (2008) definen el agua virtual de un producto (bien o servicio) como el volumen de agua dulce usada para producir dicho producto; el enfoque en el agua dulce es importante porque es ésta la que es escasa, no el agua en general. El adjetivo “virtual” se refiere al hecho de que la mayor parte del agua utilizada para producir el producto no está contenida en el producto. El interés en el agua virtual empezó a aumentar rápidamente una vez los primeros estudios cuantitativos se publicaron (Hoekstra y Hung, 2002; Hoekstra, 2003; Chapagain y Hoekstra, 2004; Oki y Kanae, 2004; De Fraiture *et al*, 2004). De este modo, la huella hídrica de una comunidad o de un individuo puede obtenerse mediante la multiplicación de todos los bienes y servicios consumidos, por su contenido de agua virtual (Hoekstra, 2009).

La HH de un sistema, individuo o de una comunidad se divide en tres componentes: azul, verde y gris. La HH azul es el volumen de agua dulce que se evapora de las aguas superficiales y aguas subterráneas usadas para producir los bienes y servicios consumidos por el individuo o la comunidad; se excluye la parte del agua que se extrae del suelo o aquel volumen de agua que vuelve al sistema directamente después de su uso o por fugas. La HH verde es el volumen de agua usada por parte de la vegetación (evapotranspiración). La HH gris es el volumen de agua contaminada que se asocia con la producción de todos los bienes y servicios para el individuo o la comunidad.

La HH puede calcularse para cualquier grupo bien definido de consumidores, entre ellos una familia, pueblo, ciudad, provincia, estado o nación (Hoekstra, 2009; Ma *et al.*, 2006; Hoekstra y Chapagain, 2007; Kampman *et al.*, 2008) o una empresa u organización (Gerbens-Leenes y Hoekstra, 2008). También se puede calcular para una actividad específica, bien o servicio. Por ejemplo, Chapagain *et al.* (2006) realizó el cálculo de la huella hídrica del algodón; Chapagain y Hoekstra (2007) evaluaron la huella hídrica del café y el té, y Gerbens-Leenes *et al.* (2008) estimaron la huella hídrica de los productos energéticos primarios.

Inicialmente el concepto de HH se ha discutido en foros de política, mas no en eventos científicos y/o ambientales (Hoekstra, 2009). Después de su lanzamiento en la reunión de expertos en Delft, en 2002, el concepto ha sido discutido en varias reuniones internacionales sobre el agua, como el Tercer Foro Mundial del Agua en Japón, en 2003; en la conferencia "El Comercio de Agua Virtual y Geopolítica", organizado por el WorldWater Council en 2003 (WWC, 2004); la reunión de expertos "El Comercio de Agua Virtual", organizado por el Instituto Alemán de Desarrollo, en Bonn, en 2005 (Horlemann y Neubert, 2007); el Cuarto Foro Mundial del Agua en Ciudad de México, en 2006; la reunión de expertos "La Gobernanza Mundial del Agua", organizado por el Proyecto Global del Sistema de Agua en Bonn, de 2006, y la segunda reunión de expertos "El Comercio de Agua Virtual", organizada por el Instituto de Investigaciones Socio-Ecológicas en Frankfurt, en 2006 (Hummel *et al.*, 2007).

Alrededor del mundo existen estudios a diferentes escalas, centrados generalmente en cinco niveles: proceso, producto, sector, unidad administrativa (país) y global (Zeng *et al.*, 2012). A nivel de proceso, como se mencionó anteriormente, Chapagain *et al.* (2006)

calcularon la HH de la producción de algodón para diferentes procesos; Van Oel y Hoekstra, (2010) estimaron la huella hídrica del proceso de producción de papel. A nivel de producto, Mekonnen y Hoekstra (2010a) estimaron la huella hídrica de 126 cultivos en todo el mundo, durante el período 1996-2005, con una alta resolución espacial; Kongboon y Sampattagul (2012) calcularon la HH para la caña de azúcar en Tailandia; la HH de pasta y pizza (Aldaya y Hoekstra, 2010) y el café y el té (Chapagain y Hoekstra, 2007) también han sido analizadas. A nivel sectorial, Aldaya *et al.* (2010) calcularon la HH de los sectores doméstico, industrial y agrícola en España y encontraron que el sector más ineficiente en el uso de agua es el agrícola. A nivel nacional se han calculado la HH de China (Liu y Savenije de 2008; Ma *et al.*, 2006), India (Kampman *et al.*, 2008), Indonesia (Bulsink *et al.*, 2010), Países Bajos (Van Oel *et al.*, 2009), Reino Unido (Chapagain y Orr, 2008), Francia (Ercin *et al.*, 2012) y recientemente Colombia (WWF, 2012). A nivel mundial, la HH de los bienes y servicios consumidos por los seres humanos han sido cuantificados por Hoekstra y Chapagain (2007) y Hoekstra y Mekonnen (2012).

En lo que se refiere a la agricultura, los estudios sobre el consumo global de agua (uso de agua por evapotranspiración) se muestran en la Tabla 1-1. L'vovich *et al.* (1990) y Shiklomanov (1993) evaluaron el consumo de agua azul a nivel continental. Postel *et al.* (1996) hicieron una estimación global de los usos consuntivos de agua azul y verde. Seckler *et al.* (1998) realizaron una primera valoración de los usos consuntivos del agua azul en la agricultura a nivel de país. Rockström *et al.* (1999) y Rockström y Gordon (2001) realizaron algunas de las primeras apreciaciones mundiales de consumo de agua verde por parte de cultivos. Shiklomanov y Rodda (2003) estimaron los usos consuntivos de agua azul a nivel de condado o municipalidad. Hoekstra y Hung (2002) fueron los primeros en hacer una estimación global del uso consuntivo del agua para un determinado número de cultivos a escala de país, pero no distinguen explícitamente los componentes verde y azul. Chapagain y Hoekstra (2004) y Hoekstra y Chapagain (2007, 2008) tomaron como base este último estudio y lo mejoraron en varios aspectos, pero todavía no distinguen explícitamente entre el consumo de agua verde y azul.

**Tabla 1-1.** Publicaciones de HH agrícola alrededor del mundo

Publicación	Escala	No de cultivos	HH azul	HH verde	HH gris
L'vovich <i>et al.</i> (1990)	Continental	-	si	no	no
Shiklomanov (1993)	Continental	-	si	no	no
Postel <i>et al.</i> (1996)	Global	-	si	si	no
Seckler <i>et al.</i> (1998)	País	-	si	no	no
Rockström <i>et al.</i> (1999), Rockström and Gordon (2001)	Global	-	no	si	no
Hoekstra and Hung (2002)	País	38	si	si	no
Shiklomanov and Rodda (2003)	Condado		si	no	no
Chapagain and Hoekstra (2004)	País	164	si	si	no
Hoekstra and Chapagain (2007, 2008)	País	164	si	si	no
Casado <i>et al.</i> (2008)	País	11	si	si	no
Rost <i>et al.</i> (2008)	Global 30'x30'	11	si	si	no
Bulsink <i>et al.</i> (2009)	País	56	si	si	si
Siebert and Döll (2008, 2010)	Global 5'x5'	26	si	si	no
Liu <i>et al.</i> (2009)	Global 30'x30'	17	si	si	no
Liu and Yang (2010)	Global 30'x30'	22	si	si	no
Hanasaki <i>et al.</i> (2010)	Global 30'x30'		si	si	no
Mekonnen y Hoekstra. (2011)	Global 5'x5'	146	si	si	si
Samoral <i>et al.</i> (2011)	Cuenca	9	si	si	no
Zeng <i>et al.</i> (2012)	Cuenca	16	si	si	no
WWF (2012)	País	10	si	si	si
Hoekstra <i>et al.</i> (2012)	País	9	si	no	no

Los estudios mencionados se realizaron a partir de imágenes y datos con baja resolución espacial, sin embargo, el avance computacional y tecnológico ha permitido aumentar dicha resolución y tener mejores resultados. Rost *et al.* (2008) hicieron una estimación global del consumo de agua verde y azul agrícola con una resolución espacial de 30 minutos de arco. Siebert y Döll (2008, 2010) realizaron cálculos del consumo global de agua verde y azul para 26 cultivos mediante una malla de celdas con una resolución espacial de 5 minutos de arco. Liu *et al.* (2009) y Liu y Yang (2010) hicieron una estimación global del consumo de agua verde y azul para la producción de 17 y 22 cultivos respectivamente, con una resolución espacial de 30 minutos de arco. Hanasaki *et al.* (2010) presentaron el consumo global de agua verde y azul para todos los cultivos, asumiendo un cultivo dominante por cada celda de 30 minutos de arco de resolución espacial. Mekonnen y Hoekstra (2010a) han sido los que han calculado, con mayor resolución espacial, la HH de los cultivos a

escala global con datos provenientes de imágenes de 5 minutos de arco de resolución espacial, para 126 cultivos en todo el mundo.

Por otro lado, a nivel de país, Casado *et al.* (2008) hacen una aproximación a la HH verde y azul para 11 cultivos en España, diferenciando los componentes azul y verde de la HH agrícola española. Bulsink *et al.* (2009) calcularon la huella hídrica de 56 cultivos de Indonesia al igual que WWF (2012) quienes estimaron la HH para 10 cultivos en Colombia. Hoekstra *et al.* (2012) calcularon la HH hídrica para los Países Bajos, sin embargo, solo se enfocaron en el componente azul.

Se encontraron pocos reportes de estudios en los cuales se estime la huella hídrica gris en la agricultura, solo Mekkonen y Hoekstra (2010a) realizaron una aproximación a escala global de HH gris para 126 cultivos y Arévalo *et al.* (2012) y Bulsink *et al.* (2009) quienes hallaron la HH gris para diferentes cultivos a nivel de país, para Colombia e Indonesia respectivamente. A nivel de cuenca hidrográfica, Samoral *et al.* (2011), realizaron estimaciones de huella hídrica extendida para la cuenca del río Guadalquivir en España; Aldaya y Llamas (2008) analizaron el agua virtual y la HH, desde el punto de vista hidrológico y económico, en la parte española de la cuenca del Guadiana y Zeng *et al.* (2012) evaluaron la huella hídrica en la cuenca del río Heihe en China y su sostenibilidad a escala mensual.

La huella hídrica pecuaria ha sido aún menos estudiada. Algunas publicaciones se refieren al uso del agua por parte de la ganadería y la producción animal y solo tres se refieren explícitamente al cálculo de huella hídrica pecuaria. La primera se llevó a cabo por Chapagain y Hoekstra (2003) y posteriormente fue actualizada por los mismos autores en su publicación "La huella hídrica de las naciones" (Chapagain y Hoekstra, 2004); Mekkonen y Hoekstra (2010b) hacen un acercamiento a la huella hídrica pecuaria incluyendo la HH gris para animales de producción a escala global.

Por otro lado, existen otros estudios que han estimado el consumo de agua por parte del sector pecuario. La FAO ha realizado esfuerzos para aproximarse a la cantidad de agua requerida por los animales de producción para su consumo y mantenimiento. De Fraiture *et al.* (2007) han estimado el consumo mundial de agua para la producción de alimento

---

para animales de producción, en dos categorías: concentrados y pastos, pero no distinguen entre los componentes verde y azul. Zimmer y Renault (2003) realizaron una apreciación aproximada del consumo mundial de agua para la producción de carne y otros productos animales; no obstante, no muestran los detalles por país, categoría de animales o de productos. Galloway *et al.* (2007) se aproximaron al cálculo del consumo de agua para pollos y cerdos en cuatro países: Estados Unidos, Japón, Brasil y los Países Bajos. Peden *et al.* (2007) hicieron una evaluación del consumo mundial de agua para producir alimento para animales de granja. Además de los estudios mencionados se han realizado algunos más específicos para la Cuenca del Nilo (Van Breugel *et al.*, 2010) y los EE.UU. (Renault y Wallender, 2000; Pimentel *et al.*, 2004).

De acuerdo con lo anterior, a pesar de que en los últimos años la producción de literatura en temas de huella hídrica va en aumento, se nota una carencia de estudios que se aproximen explícitamente al cálculo de huella hídrica a nivel de cuenca para el sector agrícola y pecuario, que discriminen la HH azul, verde y gris

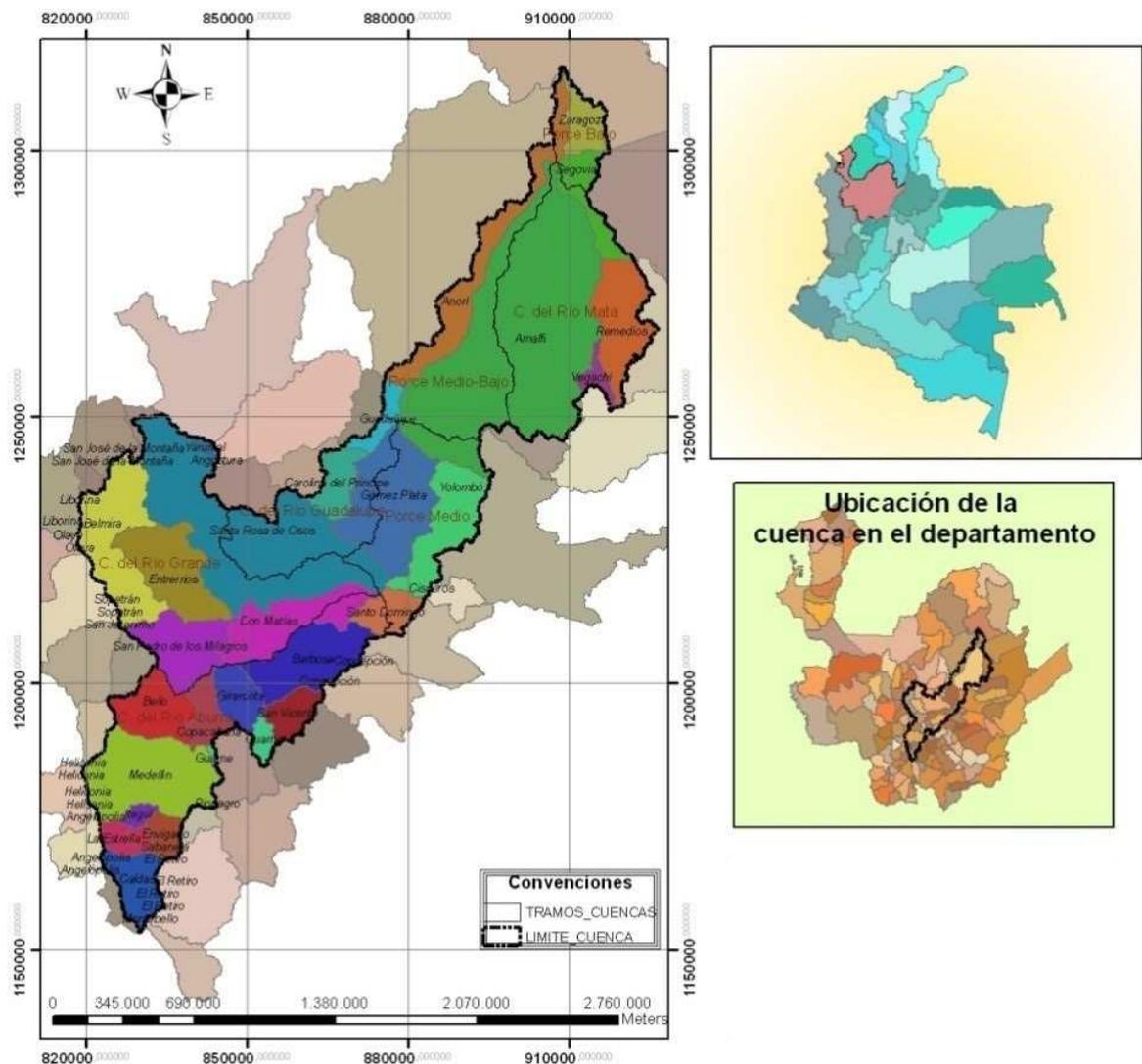
## 2. Área de estudio

El presente estudio de la huella hídrica se llevó a cabo en la cuenca del río Porce, la cual se localiza en el departamento de Antioquia, entre los 6° y 7° de latitud norte y 75° y 76° de longitud oeste (Figura 2-1), en ella tienen lugar intensas actividades agrícolas y pecuarias y se constituye como la principal proveedora de recursos para más de 4 millones de habitantes. Está definida por el río Aburrá, el cual nace en el alto de San Miguel, municipio de Caldas; atraviesa 10 municipios y se une al río Grande, en Puente Gabino, cambiando de nombre a río Porce (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Cornare, Corantioquia, y Universidad Nacional de Colombia, 2007). Éste vierte sus aguas al río Nechí, en el municipio de Zaragoza.

La topografía de la cuenca es irregular y pendiente, con altitudes que oscilan entre los 80 y 3340 msnm. En total, la cuenca del río Porce, presenta un área de 5.248 km<sup>2</sup> y la longitud de su cauce principal es de 251,59 km.

En la cuenca se asientan, total o parcialmente, 29 municipios. Entre los que presentan el total de su área en ella, se encuentran: Donmatías, Entreríos, Gómez Plata, Itagüí, Sabaneta, Girardota, Copacabana, La Estrella, Barbosa y Bello. Los municipios que se incluyen parcialmente son: Amalfi, Belmira, Medellín, Santa Rosa de Osos, Caldas, San Pedro de los Milagros, Envigado, Carolina del Príncipe, Guadalupe, San Vicente, Santo Domingo, Guarne, Yolombó, Anorí, Remedios, Segovia, Zaragoza, Vegachí y Yarumal.

Figura 2-1. Área de estudio, localización general



### 2.1.1 Vegetación

La espacialización de las coberturas terrestres se obtuvo del “Levantamiento semidetallado de las coberturas terrestres del departamento de Antioquia” (IGAC, 2007b), el cual utilizó la metodología CorineLandCover como una adaptación para el departamento de Antioquia en escala 1:25.000. La cobertura que mayor área presenta en la cuenca es el bosque natural fragmentado que se encuentra hacia la cuenca del río Mata y las áreas Porce medio-bajo y Porce bajo; a éste le siguen los pastos limpios que se encuentran, en su gran

mayoría, en la cuenca del río Grande y parte de la cuenca del río Guadalupe. Las plantaciones, por su parte, representan solo un 2,62% del área de la cuenca y se encuentran localizadas hacia el costado oriental del Valle de Aburrá, principalmente, en los municipios de Medellín y Copacabana. Se presentan también algunas áreas sembradas en los municipios de Caldas, Sabaneta, San Pedro de los Milagros, Belmira, Entrerriros, Carolina del Príncipe, Amalfi, entre otros, donde el área cultivada supera el 20% del área de estudio y los cultivos se encuentran dispersos por toda el área de la cuenca; el municipio con mayor área cultivada es Santa Rosa de Osos.

### **2.1.2 Suelos**

Los suelos de la zona de estudio se delimitaron a partir del “Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Antioquia” (IGAC, 2007a), las asociaciones de suelos presentes en la cuenca son: Asociación Aldana (AL), Asociación Amagá (AN), Asociación Andes (AG), Asociación Angelópolis (AE), Asociación El Cinco (EC), Asociación Guadua (GD), Asociación Horizontes (HB), Asociación Ituango (IT), Asociación Llano Largo (LL), Asociación Margarita (GM), Asociación Niquía (NQ), Asociación Poblano (PO), Asociación Remedios (RM), Asociación Rionegro (RN), Asociación Sabaneta (SA), Asociación Santa Bárbara (SB), Asociación Tequendamita (TE), Asociación Ventanas (VC), Asociación Yalí (JD), Asociación Yarumal (YA), Asociación Zaragoza (ZC), Asociación Zulaibar (ZL), Complejo Girardota (GS), Complejo Ite (IV), Complejo La Pulgarina (LP), Complejo Tarazá (TR) y Consociación Calderas (CL). La asociación ZL es la que mayor área presenta en la cuenca con 969,91 km<sup>2</sup>, seguida de la asociación YA con 915,23 km<sup>2</sup>, mientras que la consociación CL ocupa un área de 1,41 km<sup>2</sup>. Esta variedad de asociaciones implica una alta diversidad de tipos de suelos, los cuales presentan diferentes restricciones para su uso y potencialidades en cuanto a su oferta de recursos.

## 2.2 Clima

La precipitación en la cuenca varía de 1650 mm a 3850 mm, siendo la zona sur (Medellín, Bello, Copacabana) la que presenta los menores valores; no obstante, más hacia el sur, en los municipios de Caldas, Sabaneta y Envigado estos valores se incrementan. La mayor pluviosidad se presenta en la zona media de la cuenca (Santo Domingo, Carolina del Príncipe, Guadalupe). La parte baja presenta una precipitación intermedia que varía entre los 2000 y 3000 mm al año (Anexo A).

La temperatura tiene una relación inversamente proporcional a la altura media sobre el nivel del mar, es de esperarse que la temperatura varíe de igual forma. De acuerdo con esto, se estimó la temperatura a través del método de regionalización propuesto por el Centro Nacional de Investigaciones del Café (Chávez y Jaramillo, 1999), el cual es un buen estimativo de la temperatura media en todo el país y se calcula mediante la siguiente expresión.

$$T_{MEDIA} = 29,38 - 0,0061 * H$$

$$R^2 = 0,98$$

Las temperaturas medias oscilan entre los 9°C a los 28,8°C (Anexo B), siendo las partes bajas de la cuenca las de mayor temperatura (Zaragoza y Anorí), mientras que las temperaturas más bajas se encuentran al occidente (San Pedro, Belmira, Santa Rosa, Entrerios, Yarumal y Donmatías). La cuenca tiene una temperatura media total de 19°C.

La evapotranspiración media en la cuenca es de 925 mm/año aproximadamente, y debido a que está en función principalmente de la temperatura, su distribución es similar, siendo los municipios de San Pedro, Belmira, Santa Rosa, Entrerios, Yarumal y Donmatías los que presentan los menores valores, y los municipios de la parte baja, los que mayor evapotranspiración tienen, sumados a Medellín y la parte sur del Área Metropolitana (Anexo C).

El caudal medio a la salida de la cuenca es de 234 m<sup>3</sup>/s (Anexo D), valor que se validó con los datos de caudal de las estaciones Gabino RMS y PP7 Ermitaño, encontrándose errores del 8% y 25% respectivamente, similares a los encontrados en el cálculo de caudales medios en el plan de ordenamiento y manejo de cuencas (POMCA) del río Aburrá (AMVA, Cornare, Corantioquia, y Universidad Nacional de Colombia, 2007).

## 3. Metodología

### 3.1 Huella hídrica agrícola

Se empleó el modelo *CROPWAT 8.0* (FAO, 2010), es un programa de computación que utiliza el método de la FAO Penman-Monteith para determinar la evapotranspiración de los cultivos (ET), requerimientos de agua y riego en base a datos climáticos, suelos y de cultivo ya sean existentes o nuevos. CROPWAT es un sistema de apoyo a la toma de decisiones desarrollado por la FAO. Pretende ser una herramienta práctica para llevar a cabo cálculos de manera rápida y amigable de la evapotranspiración de referencia, las necesidades de agua de los cultivos, y más específicamente el diseño y manejo de sistemas de riego. (FAO, 2010).

Este modelo ha sido ampliamente utilizado en diversos estudios de HH a nivel mundial. La principal utilidad de este es que permite cuantificar el requerimiento de agua de los cultivos que puede ser suplido por la precipitación o por algún sistema de riego, a través del análisis de variables climáticas, edáficas, del propio cultivo y de un balance hídrico diario del suelo.

La huella hídrica total del proceso de los cultivos ( $HH_{proc}$ ) se determinó a partir de la suma de los componentes verde, azul y gris:

$$HH_{proc} = HH_{proc, azul} + HH_{proc, verde} + HH_{proc, gris} \quad (1)$$

La huella hídrica está expresada en unidades de volumen de agua por unidad de masa ( $m^3/ton$ ). El método es aplicable a cultivos anuales y perennes.

El componente verde de la huella hídrica de un cultivo o árbol ( $HH_{proc, verde}$ ,  $m^3/ton$ ) se calculó como el agua verde utilizada por el cultivo ( $CWU_{verde}$ ,  $m^3/ha$ ) dividido por el rendimiento de los cultivos ( $Y$ ,  $ton/ha$ ). El componente azul ( $HH_{proc, azul}$ ,  $m^3/ton$ ) se calcula de una manera similar:

$$HH_{proc,verde} = \frac{CWU_{verde}}{Y} \quad (2)$$

$$HH_{proc,azul} = \frac{CWU_{Azul}}{Y} \quad (3)$$

### 3.1.1 Requerimiento de agua azul y verde de los cultivos (CWU<sub>verde</sub> y CWU<sub>azul</sub>)

El modelo presenta el requerimiento de agua verde del cultivo como la precipitación efectiva y corresponde al agua proveniente de la precipitación que realmente fue utilizada por el cultivo durante el período de análisis, desde la época de siembra hasta la época de cosecha. El resultado se da en mm, razón por la cual es necesario multiplicar por 10 para que quede expresada en m<sup>3</sup>/ha, a lo cual se le denomina consumo de agua del cultivo (CWU<sub>verde</sub>).

El requerimiento de agua azul del cultivo (CWR<sub>azul</sub>) se obtiene mediante la diferencia entre el requerimiento de agua del cultivo y la precipitación efectiva, del módulo de programación del *CROPWAT*; si esta diferencia es menor o igual a 0 se tiene que no hay HH azul. Estas variables son dadas por el *CROPWAT* en mm, por lo cual se sigue el mismo procedimiento descrito para CWR verde para llegar a m<sup>3</sup>/ha.

El modelo requiere de 3 tipos de variables diferentes (clima, cultivos, suelos) y se obtuvieron como se menciona a continuación:

- **Clima**

Las variables climáticas requeridas por este modelo (precipitación, temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento) fueron obtenidas a través de 36 estaciones de la red climatológica de las Empresas Públicas de Medellín (EPM), con una resolución diaria de un periodo de 11 años 2000-2010. Con el fin de lograr una mejor representación de cada una de las variables mencionadas (excepto la velocidad del viento), se realizó una interpolación tipo Krigging para así tener datos climatológicos, píxel a píxel, dentro de la cuenca del río Porce. Debido a que la información está a nivel de municipio, se clasificó en clima calido (0-1000 m.s.n.m), clima medio (1000-2000 m.s.n.m) y clima frio (>2000 m.s.n.m) y se realizó un promedio, por municipio y tipo de clima, de cada una de las

variables climáticas requeridas y éste se asumió como la condición que mejor representa al clima de los cultivos presentes en un municipio dado. Estos valores fueron convertidos al formato requerido por el modelo CROPWAT 8.0, y añadidos al módulo Climate/Eto y Rain del mismo.

▪ Cultivos

Dado que muchos datos no están disponibles a nivel de cuenca, se combinaron los datos estadísticos de los límites administrativos (municipios) con conjuntos de datos espacialmente explícitos y zonas de vida para obtener la información a nivel de cuenca. En la cuenca del río Porce se encuentran, total o parcialmente, 29 municipios, para los que se determinó un factor ponderador, en función del área del municipio, dentro de la cuenca y así pasar los datos estadísticos del nivel municipal a nivel de cuenca. La principal fuente de información acerca de los cultivos presentes en la cuenca proviene del Anuario Estadístico de Antioquia (AEA), del cual se utilizó la información de cultivos, área plantada, área en producción y rendimiento por ha de los años 2005 al 2010. El AEA reporta para los años 2005-2010, aproximadamente 48 cultivos (Tabla 3-1).

Tabla 3-1. Cultivos presentes en la cuenca del río Porce

CULTIVO			
Aguacate	Cilantro	Guayaba manzana	Pepino
Ajo	Cítricos	Habichuela	Pimentón
Apio	Col	Lechuga	Piña
Arroz tradicional	Coliflor	Maíz	Plátano
Arveja	Espinaca	Mandarina	Remolacha
Cacao	Fique	Mango	Repollo
Café	Fresa	Mora	Tomate chonto
Caña	Frijol arbustivo	Naranja	Tomate de árbol
Caucho	Frijol voluble	Pastos	Tomate invernadero
Cebolla de huevo	Guanábana	Papa	Yuca
Cebolla junca	Guayaba	Papa criolla	Zanahoria

**Fecha de siembra y cosecha.** Es la fecha en que inicia el ciclo productivo de los cultivos y depende de las características fisiológicas de cada uno, del clima y la dinámica económica local. Se debe tener en cuenta que para los cultivos transitorios es necesario calcular la demanda hídrica cada vez que se siembre en el año. Las fechas de siembra de los cultivos

fueron tomadas de diferentes fuentes de información secundaria como FAO (2006), IDEAM (2010), entre otros. En algunos casos se consultaron fuentes primarias, mediante salidas de campo a los municipios.

**Coeficiente del Cultivo ( $k_c$ ) y fases de crecimiento.** En los cultivos normalmente se diferencian 4 etapas o fases de (FAO, 2006). La duración de cada una de esas etapas depende de las características fisiológicas de cada cultivo. Los valores de  $K_c$  fueron obtenidos de las bases de IDEAM (2010) para los cultivos de Colombia y FAO (2006) a escala global.

**Profundidad radicular.** Define la capacidad de los cultivos para aprovechar la reserva de agua del suelo. Estos valores están reportados en la literatura para la mayoría de cultivos encontrados en la cuenca del río Porce y fueron usados los reportados en FAO (2006).

**Fracción de agotamiento crítico ( $p$ ).** Los valores se expresan como una fracción del agua disponible total (ADT) y, en general, varían entre 0.4 y 0.6. La fracción de agotamiento crítico aparece referenciada, para algunos cultivos, en el estudio FAO (2006); para aquellos cultivos que no se tenía dicho valor, se tomó un valor de 0,5 de acuerdo a la recomendación contenida en el mismo documento.

**Factor de respuesta de la productividad del cultivo ( $K_y$ ).** La FAO (2006) presenta valores de  $K_y$  que son específicos para cada cultivo y pueden variar durante la etapa de crecimiento del mismo. Para los cultivos que no tenían valores de  $K_y$  se tomaron valores de cultivos similares; para aquellos que no había posibilidad de establecer un símil con otro, se asumió un  $K_y$  de 1, como lo recomienda la FAO (2006).

**Altura del cultivo.** Se toma de la literatura para cada cultivo. Este dato es opcional y en caso de que no se ingrese, no se hará ningún ajuste (FAO, 2006).

- Suelos

Toda la información de suelos fue tomada del “Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Antioquia” publicado por el IGAC (2007). En total se identificaron, en la cuenca del río Porce, 22 asociaciones, 4 complejos y 1 consociación de

suelos. Estas unidades edáficas fueron tomadas como el nivel mínimo de análisis de la variable suelos y para cada unidad se estimaron las variables que solicita el CROPWAT.

**Agua Disponible Total (ADT).** Representa la cantidad total de agua disponible para el cultivo, se expresa en mm por metro y se define como la diferencia en el contenido de humedad del suelo entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). Para calcular el ADT se utilizó el módulo SoilWaterCharacteristics del software libre SPAW Hidrology que utiliza información de la granulometría del suelo y con este parámetro se calcula la disponibilidad de agua de cada horizonte de suelo en cm/cm.

**Tasa máxima de infiltración.** Representa la lámina de agua que puede infiltrarse en el suelo en un periodo de 24 horas y tiene el mismo valor que la conductividad hidráulica del suelo a saturación (FAO, 2006). Este último dato de conductividad hidráulica es el que se utilizó en el análisis, y fue obtenido para cada asociación y cada perfil modal a través del software SPAW Hidrology mediante la utilización de ecuaciones empíricas en función de la granulometría, porosidad y la textura de suelo obtenida del levantamiento de suelos de IGAC (2007).

**Profundidad radicular máxima.** Para la cuenca del río Porce, la profundidad máxima radicular se asumió como la profundidad máxima de los perfiles del suelo en cada una de las asociaciones y consociaciones presentes dentro de la cuenca reportados en el estudio del IGAC (2007).

**Agotamiento inicial de la humedad del suelo.** Indica la humedad o sequedad del suelo al inicio de la época del cultivo. Se expresa como un porcentaje (%) del agua disponible total. El valor por defecto de 0% representa un perfil de suelo húmedo a CC y 100% es un suelo en PMP. Para el cálculo de la HH Agrícola en la cuenca del río Porce se colocó por defecto un valor de 0% para cultivos establecidos en meses húmedos (marzo, abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre) y un valor de 50% para meses secos (enero, febrero, junio, julio, agosto y diciembre).

### 3.1.2 Agua virtual, huella hídrica azul y verde agrícola

El módulo utilizado para el cálculo de agua virtual es el de programación, este incluye el parámetro de balance de agua del suelo ( $k_s$ ), por lo cual en caso de un déficit de agua por baja precipitación efectiva, el modelo toma el agua del suelo, lo que significa que las necesidades de riego solamente serán calculadas cuando se presente déficit hídrico en el suelo.

El modelo presenta la HH verde o contenido de agua virtual verde como la división entre el requerimiento de agua verde del cultivo ( $CWU_{verde}$ ) en  $m^3/ha$  y el rendimiento del cultivo ( $Y$ ) en  $ton/ha$  Eq 2, para así obtener un valor en  $m^3/ton$ . De manera similar se calcula la huella hídrica azul o contenido de agua virtual azul Eq 3.

La huella hídrica total en  $m^3$  por año se obtiene multiplicando el contenido de agua virtual en  $m^3/ton$  por la producción total en toneladas del cultivo, analizado en un año, mes o periodo deseado.

### 3.1.3 Agua virtual y huella hídrica gris agrícola

Para el cálculo de la huella hídrica gris se utilizó como referente la contaminación del agua por causa de aplicación de fertilizantes (no se tuvo en cuenta pesticidas y otros agroquímicos debido a que en Colombia todavía hay muy poca información al respecto), específicamente la aplicación de nitrógeno (N) y fósforo (P).

El cálculo de la HH gris se realizó solo para la contaminación por nitrógeno, ya que el fósforo, aplicado como fertilizante que no es absorbido por la planta, generalmente se acumula en el suelo y solo una fracción muy pequeña va hacia las fuentes de agua subsuperficiales y subterráneas (Ercin *et al.*; 2011).

Además de lo anterior, para el cálculo de la HH gris agrícola por fertilización con N, debe tenerse en cuenta la siguiente información:

- Tasa de lixiviación del nitrógeno: 10% del nitrógeno total aplicado (Hoekstra & Chapagain, 2008).

- Concentración máxima permitida de nitrógeno: 30 mgN/litro (Boulay *et al.*, 2011.).
- Concentración natural del nitrógeno: 0,01 mgN/litro (REDRIO, 2011).

Para el cálculo de la HH gris se divide la cantidad de fertilizante aplicado (kg/ha), con la diferencia entre la concentración máxima permitida (kg/m<sup>3</sup>) y la concentración natural (kg/m<sup>3</sup>) según la siguiente expresión:

$$HH_{proc,gris} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} \quad (4)$$

Donde;

HH<sub>proc,gris</sub>: Huella hídrica gris de un producto agrícola específico (m<sup>3</sup>/ha).

L: Cantidad de fertilizante aplicado (Kg/ha).

C<sub>max</sub>: Concentración máxima permisible del N y/o P en el agua (Kg/m<sup>3</sup>).

C<sub>nat</sub>: Concentración natural del N y/o P en el agua (Kg/m<sup>3</sup>).

El valor obtenido en el cálculo anterior corresponde a la HH gris de un producto agrícola en una hectárea cultivada; sin embargo, es necesario dividir este valor por el rendimiento del cultivo (ton/ha). De esa manera, se obtiene la cantidad de m<sup>3</sup> de agua que se requieren, por tonelada de producto agrícola, para diluir la carga contaminante del N hasta un valor máximo permisible de 30 mgN/litro.

## 3.2 Huella hídrica pecuaria

La huella hídrica pecuaria se da en m<sup>3</sup>/ton de peso vivo, y se halla dividiendo el consumo total de agua en m<sup>3</sup> por el número de animales dentro de la cuenca del río Porce, multiplicado por su peso vivo promedio (ton), valor que se extrae de los AEA.

### 3.2.1 Huella hídrica del alimento

La huella hídrica del alimento, para el sector pecuario, corresponde a la huella hídrica verde de los pastos presentes en la cuenca que son utilizados para la alimentación de equinos y bovinos. Esta HH se calculó por medio de CROPWAT, siguiendo el mismo procedimiento utilizado para los cultivos. Los pastos ubicados en las zonas de ganadería de leche

(intensiva) se trabajaron con rendimientos de 15 ton/ha, mientras que para las demás (extensiva) se asumió un rendimiento de 5 ton/ha (Palacio, 2005), de esta manera se halla la huella hídrica verde o contenido de agua virtual verde (m<sup>3</sup>/ton) de los pastos en la cuenca del Porce.

El consumo de pastos por animal depende, entre otros factores, del peso promedio. Para conocer el peso promedio de los bovinos en la cuenca del río Porce se consultó el estudio de Gómez y Rueda (2011). Por otro lado, se estima que un bovino consume diariamente, en materia seca, un promedio de 2,7% de su peso vivo, y que el forraje verde tiene porcentajes de humedad que oscilan entre 65% y 85% (SENA, 1985). Para el presente estudio se utilizó un porcentaje de humedad del pasto de 80%, según lo recomendado por Gómez y Rueda (2011).

De acuerdo a lo anterior, es posible calcular la cantidad de pasto en kg que consume un bovino por día dependiendo de su peso y edad de la siguiente manera:

$$Req.MS \left( \frac{Kg}{Animal, dia} \right) = \frac{peso_{animal,vivo} (Kg) * 2.7\%}{100\%} \quad (6)$$

Donde:

Req. MS = Requerimiento de materia seca por animal.

Peso vivo animal= Peso del animal dependiendo de su edad.

2,7%= Valor de requerimiento de materia seca con relación al peso total del bovino (Gomez y Rueda, 2011).

Dado lo anterior se calcula el requerimiento total del forraje verde así:

$$Req. Total FV \left( \frac{kg}{Animal*día} \right) = Req MS + Req MS * \frac{80\%}{20\%} \quad (7)$$

Donde:

Req. Total FV= Requerimiento total de forraje verde por animal por día.

Req MS = Requerimiento de Materia seca por animal por día.

80% = Porcentaje de humedad asumido para el forraje verde.

20% = Porcentaje de materia seca en el forraje verde.

En el caso de los equinos, se siguió la metodología ya descrita para el cálculo del consumo de forraje en bovinos, pero utilizando como datos de referencia recomendados por Buchanan (2003)

Peso promedio del equino: 350 kg

Requerimiento de materia seca por día= 1,5% del peso vivo del animal.

Humedad del forraje verde= 80%.

Los requerimientos de materia seca (ton) de bovinos y equinos, por municipio, se multiplican por el valor de la HH verde en m<sup>3</sup>/ton de los pastos para obtener un valor de consumo de agua verde en m<sup>3</sup>. El contenido de agua virtual verde de los bovinos y equinos se obtiene dividiendo el valor del consumo de agua verde en m<sup>3</sup> por el peso promedio en ton de los bovinos o equinos.

Es importante señalar que para los subsectores bovino, equino, porcino, y avícola también se usan concentrados para la alimentación; sin embargo, estos no se tuvieron en cuenta dentro del cálculo de HH del alimento, ya que corresponden al sector industrial.

### **3.2.2 Huella hídrica del consumo**

El estudio nacional del agua - ENA (IDEAM, 2010) presenta valores promedio de consumo diario de agua para los subsectores bovino, equino, porcino y avícola. Estos valores se utilizaron en el presente estudio para el cálculo de la HH azul, (expresada en m<sup>3</sup>) asociada al consumo de agua. Para el subsector bovino se identificó el consumo diario de agua promedio para animales, en cuatro categorías de análisis: hembras y machos mayores de 36 meses; entre 24 y 36 meses; entre 12 y 24 meses; y menores de 12 meses.

Para el caso de los equinos, se presenta un valor promedio de 35 litros al día por animal (litros/animal/día). Este es un valor promedio, tanto para caballos como para mulares y asnales, y fueron utilizados en los cálculos de la HH (IDEAM, 2010). En el subsector avícola, se reporta un valor promedio de consumo de agua de 0,24 litros/animal/día, valor que se tomó como referencia para calcular la HH azul de este subsector. Para el subsector porcino también se tuvieron en cuenta los valores de consumo de agua diarios promedio:

12 litros/animal/día reportados en IDEAM (2010). Los valores de HH calculados en este aparte se cargaron a la huella hídrica azul del sector.

### 3.2.3 Huella hídrica de la servidumbre

La información que se utilizó para el cálculo del consumo de agua (expresada en m<sup>3</sup>), para el manejo de los animales en las diferentes actividades pecuarias, están reportados en (IDEAM, 2010). Sin embargo, se debe tener en cuenta que esta información es muy general y no diferencia entre ganadería de carne y ganadería de leche, ni entre aves de engorde o de postura; no obstante, son valores que permiten tener un dato aproximado de estos consumos de agua.

### 3.2.4 Cálculo de la huella hídrica gris del sector pecuario

La información para calcular la contaminación del agua por las actividades pecuarias también es bastante limitada en la cuenca del río Porce; por esa razón, es necesario recurrir a datos secundarios, de otras regiones del país, así como a métodos indirectos de estimación de contaminación por animales.

Para el cálculo de la HH gris de los subsectores bovino y equino, se utilizó el mismo procedimiento aplicado a la HH gris agrícola: contabilizando solo N a una tasa de lixiviación del 10%; y usando datos de contenidos de N en orina y heces, obtenidos de León *et al.* (2008): excreción fecal de N (g/día)= 210,9 y excreción urinaria de N (g/día)= 240,6.

En el caso de los Equinos, Buchanan (2003) estima que el aporte promedio de N/día de los equinos es de 1750 g/día.

En el caso de las aves y los porcinos, se utilizó el método de estimación indirecta de contaminación, conocido como el equivalente-habitante, desarrollado en Francia y aplicado en el Plan de Manejo de la Cuenca del Río Cauca-Magdalena (CORMAGDALENA, 2007). Este estudio estima que un habitante (persona) contamina en promedio 0,012 kg N/día; y presenta equivalencias entre la contaminación generada por una persona y los animales: de esta manera, un cerdo contamina lo que 3 habitantes,

mientras que una gallina entre 0.15 y 0.25 habitantes. Con estos valores se calculó la HH gris, tanto de los porcinos como de las aves aplicando la ecuación 4.

### **3.2.5 Determinación del número de animales por municipio en la cuenca del río Porce**

El número de bovinos y equinos, en un área determinada, está relacionado proporcionalmente con el área de pastos en esa superficie y con el tipo de manejo de los animales. Los valores totales de animales que presentan los AEA están para el área total de cada municipio. En este estudio se asumió, que en aquellos municipios que no están totalmente incluidos dentro de la cuenca, el número de animales dentro de la misma es proporcional al área en pastos dentro de la cuenca; posteriormente, ese porcentaje se multiplicó por el número total de bovinos y equinos reportados para cada municipio y así se obtuvo el número de animales que están dentro de la cuenca.

Se asumió que el número de porcinos y aves dentro de la cuenca es proporcional al área de cada municipio que, igualmente, se encuentra dentro; por ejemplo, si un municipio X tiene el 20% de su área dentro de la cuenca, el 20% de los animales también.

## **3.3 Metodología aplicada para el análisis de sostenibilidad ambiental en la cuenca del río Porce**

Este análisis busca comparar las huellas hídricas (azul, verde y gris) del sector agrícola y pecuario, con la oferta ambiental de agua de la cuenca analizada. La metodología fue aplicada a la cuenca del río Porce y para 31 subcuencas o subtramos en que ésta fue dividida, denominándose “análisis de sostenibilidad ambiental”, en donde se comparan las HH obtenidas con diferentes escenarios posibles y deseados según los planes de ordenación y manejo de las cuencas y las metas de conservación y protección ambiental, establecidas por las autoridades ambientales.

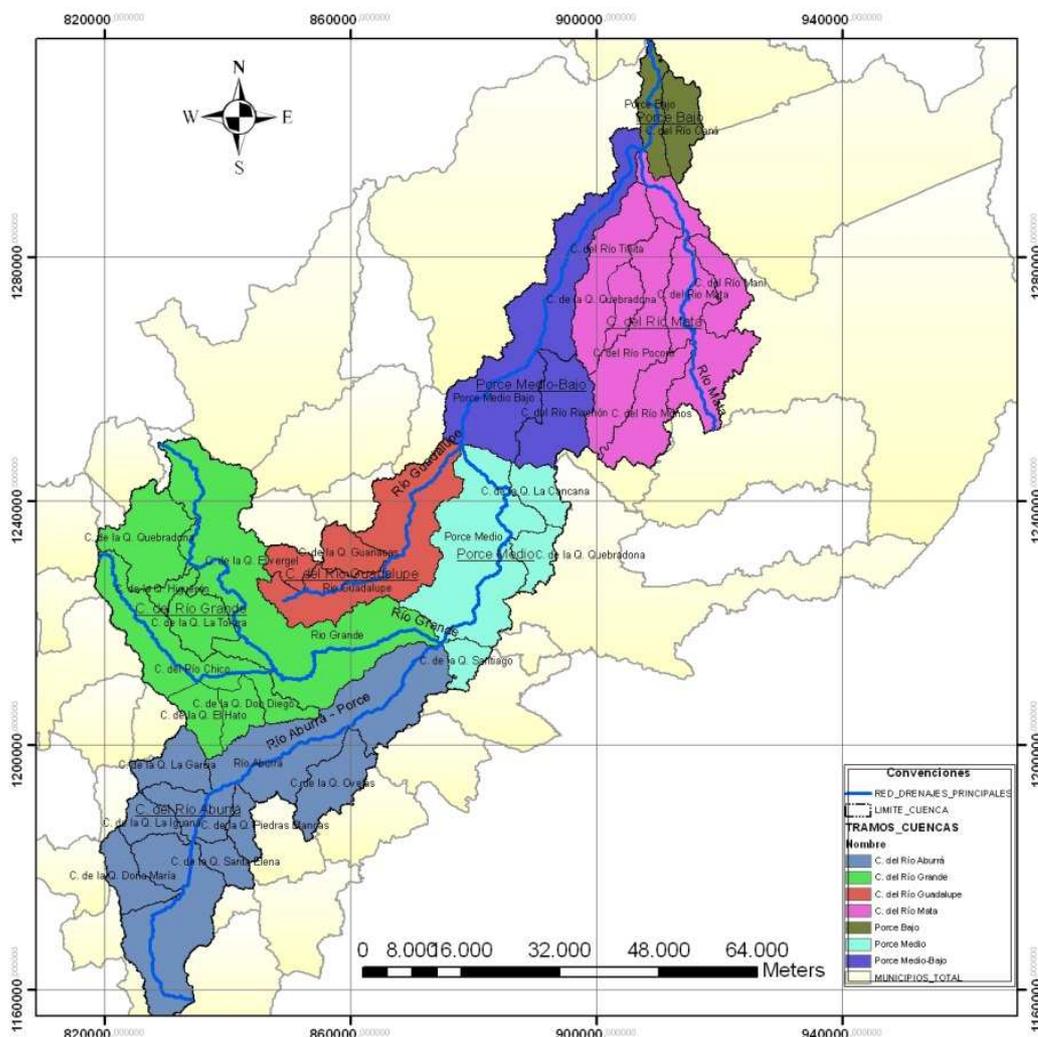
Las subcuencas y subtramos que se identificaron, corresponden a una subdivisión realizada de acuerdo con la división hidrológica del departamento de Antioquia (Figura 3-1). Para esto se utilizó el módulo de modelación hidrológica HydroSIG, con un DEM de resolución de píxel a 90 metros (SRTM 90). Se reconocieron siete grandes cuencas o

---

tramos: cuenca del río Aburrá, del río Grande, del río Guadalupe y del río Mata; los tramos corresponden al tramo Porce medio, Porce medio bajo y Porce bajo. En cada uno de ellos, a su vez, se encontraron diferentes subcuencas y subtramos, para los cuales se realizó el análisis de sostenibilidad.

La división de la cuenca del río Porce, en 31 subcuencas y subtramos, se realizó con el fin de disminuir el error introducido por la variabilidad espacial, en las variables hidroclimáticas, y obtener caudales reales para cada zona. Con esta metodología, el análisis de sostenibilidad ayuda a comparar los resultados en cada área, logrando identificar en cuáles se presentan menor oferta ambiental hídrica, y por tanto, deberían ser objeto de una observación más detallada (Hotspots ambientales).

Figura 3-1. División de la cuenca del río Porce en cuencas tramos y subcuencas



### 3.3.1 Análisis ambiental de la huella hídrica azul

Para realizar el análisis ambiental de la HHA, inicialmente fue necesario estimar la HHA total y la oferta natural de agua para la cuenca del río Porce y las 31 subcuencas.

La oferta natural de agua se calculó a partir del modelo hidrológico distribuido TETIS, el cual requiere información de las características de la cuenca y de las condiciones hidroclimáticas. Los caudales, en toda la cuenca, se simulaban asumiendo condiciones

naturales, donde las intervenciones antrópicas, como los embalses y los trasvases, no se tuvieron en cuenta por falta de información.

Siguiendo los lineamientos de la metodología propuesta por Hoekstra *et al.* (2011), el paso siguiente fue estimar un caudal ecológico, el cual es “El caudal que mantiene el funcionamiento, composición y estructura del ecosistema fluvial que el cauce contiene en condiciones naturales, preservando los valores ecológicos, el hábitat natural y funciones ambientales” (IDEAM, 2010). En el caso de la cuenca del río Porce, se aplicó la metodología propuesta en IDEAM (2010), denominada percentil Q95, la cual se define como el caudal que es igualado o excedido el 95% del tiempo. Para obtener el caudal ecológico en cada unidad de análisis fue necesario realizar los siguientes cálculos:

De esta forma, la oferta de agua azul ( $OA_a$ ) mensual se obtuvo con la ecuación:

$$OA_{natural\ azul\ mensual} = Oferta_{natural\ mensual} - Caudal\ Ecológico_{mensual} \quad (8)$$

Finalmente, a la oferta de agua azul se le debe restar la HHA, de esta forma se analiza si la cuenca o subcuenca tiene la capacidad de abastecer las necesidades de la población, o si por el contrario están demandando mayor cantidad de agua de la que dispone el afluente.

La escasez (E) de agua azul mensual en la cuenca se calculó con la información obtenida anteriormente y aplicando la siguiente ecuación:

$$E_{azul\ mensual} = \frac{\sum HH_{azul\ mensual}}{OA_{natural\ y\ regulada}_{azul\ mensual}} \quad (9)$$

### 3.3.2 Análisis ambiental de la huella hídrica verde

La sostenibilidad ambiental de la huella hídrica verde (HHV) debe entenderse como la capacidad que tiene una cuenca hidrográfica o espacio geográficamente delimitado para satisfacer las necesidades de agua verde de las actividades que en ella tienen lugar, así como de las áreas, dentro de la cuenca, que han de ser reservadas, con el fin de preservar la biodiversidad. El análisis ambiental de la HH verde para las actividades agrícolas y

pecuarias se realiza mediante el cálculo del índice de escasez de agua verde, para el cual, se divide la sumatoria de las HH verde, mensual, entre la disponibilidad de agua verde (DAV) mensual. Valores menores a 1 denotan los meses en los cuales hay sostenibilidad de la HHverde; un valor igual a 0 quiere decir que se está utilizando toda el agua verde disponible, mientras que valores mayores a 1 indican los meses en los cuales se presentan *hotspots ambientales*, dado que la huella hídrica es mayor que la disponibilidad. El cálculo se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$E_{verde,mensual} = \frac{\sum HH_{verde,mensual}}{DA_{verde,mensual}} \quad (10)$$

La DAV mensual está dada por la diferencia entre la evapotranspiración real (ETa) por subcuenca y la ETa de la vegetación natural y de las zonas no productivas, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$DA_{verde,mensual} = ET_{x,t(total,mensual)} - ET_{x,t(natural,mensual)} - ET_{x,t(inprod,mensual)} \quad (11)$$

El cálculo de la  $ET_{x,t}$  (total mensual), en la cuenca del río Porce, se realizó a partir de los datos de las estaciones climáticas, usando el modelo de Penman-Montheith, del módulo de clima del software *CROPWAT 6.0*, multiplicado por un factor Kc dependiente de la cobertura vegetal.

El análisis de DAV se realizó bajo dos escenarios. El primero, denominado “Escenario actual” para el cual se utilizó el mapa de coberturas terrestres actuales de la cuenca, contempla como *vegetación natural* las áreas que en cada subcuenca o subtramo se encuentran en cobertura protectora (bosques naturales densos y fragmentados; bosques de galería o riparios; arbustos, matorrales y vegetación esclerófila, de páramo y subpáramo). La evapotranspiración  $ET_{x,t}$  (natural, mensual) de estas áreas se halló multiplicando el porcentaje de éstas por la evapotranspiración total de la cuenca. Bajo este escenario, se calculó, de la misma manera, el porcentaje que ocupan las áreas no productivas (territorios artificializados, aguas continentales, áreas húmedas y áreas abiertas sin o con poca vegetación) para así estimar la  $ET_{x,t}$ (inproductiva, mensual).

El segundo escenario es denominado "Escenario de zonificación", aquí las áreas consideradas como vegetación natural son aquellas que dentro de la cuenca deberían de ser reservadas para la conservación de la biodiversidad y el apoyo a los medios de vida humanos que dependen de los ecosistemas naturales en la cuenca. Estas áreas fueron definidas a partir de los planes de ordenamiento y manejo de cuencas (POMCA) existentes en la cuenca del río Porce. Solo las subcuencas del río Aburrá y río Grande cuentan con este tipo de estudios, así que se usaron aquellas áreas que están definidas como conservación ambiental, protección ambiental, recuperación para la conservación ambiental y recuperación para la protección ambiental, precisadas en la zonificación ambiental de cada uno de estos planes.

Para las subcuencas, aguas abajo, de la cuenca del río Aburrá y río Grande, se asumió que las áreas que deben destinarse a la conservación del ecosistema, deben ser las que actualmente están bajo cobertura boscosa. En este escenario, las zonas no productivas son las definidas en los POMCAS como consolidación de usos urbanos, producción industrial y producción minera. Para las cuencas en las cuales no se contaba con esta información, se tomaron las áreas no productivas a partir del mapa de coberturas.

### **3.3.3 Análisis ambiental de la huella hídrica gris**

La huella hídrica gris se evalúa de manera similar a la HH azul. La HH gris agrícola y pecuaria se compara, en este caso, con la oferta natural regulada ( $R_{total}$  mensual, con trasvases) y no con la oferta natural; además se debe restar la HHA, ya que esta agua no está disponible para diluir el mayor contaminante. La cuenca del Porce es altamente regulada por la presencia de cinco embalses y varios trasvases, por lo cual se debe realizar un análisis especial, que requiere de información de operación de embalses, cotas de inundación, caudales de descarga, entre otras, que no fue posible obtener en el presente estudio. Debido a lo anterior, se asumió que la oferta regulada corresponde a los caudales simulados con TETIS, más o menos los trasvases que se tienen de otras cuencas (trasvase Nechi-Pajarito y La Fe).

El índice que se calcula en la sostenibilidad de la HH gris se denomina "nivel de contaminación del agua" (NCA) y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$NCA_{mensual} = \frac{\sum HH_{gris,mensual}}{R_{total,mensual}} \quad (12)$$

Un nivel de contaminación del agua de 100% o superior, significa que la capacidad de asimilación del contaminante ha sido alcanzada o excedida, valores inferiores al 100% indican que aún el afluente tiene capacidad para asimilar el contaminante analizado.

### 3.4 Metodología usada para la modelación hidrológica distribuida en la cuenca río Porce

Para estimar la oferta de agua azul de la cuenca del río Porce, y realizar el análisis de sostenibilidad ambiental, se utilizó el modelo hidrológico distribuido TETIS, el cual fue propuesto por Vélez, 2001. Este es un modelo físico en el cual se busca representar los diferentes procesos que se dan tanto en superficie como al interior de la cuenca para ello, se vale del uso de diferentes tanques de almacenamiento, enmarcando diferentes procesos dentro de cada uno (Velázquez, 2011). A continuación se describe el proceso de modelación:

#### 3.4.1 Construcción de los mapas de entrada

El modelo requiere 8 mapas en formato .ascii:

- Modelo digital de elevación - DEM
- Pendientes
- Dirección de flujo
- Flujo acumulado
- Coberturas del suelo
- Conductividad hidráulica saturada del suelo Ks
- Conductividad hidráulica saturada del sustrato del suelo Kp
- Capacidad de almacenamiento Hu

A partir del DEM se obtiene el mapa de pendientes, dirección de flujo y el flujo acumulado, estos se generan a partir de las diferentes herramientas del software ARCGIS e

*HIDROSIG*. Los mapas Ks, Kp y Hu se obtienen a partir del mapa de suelos, coberturas vegetales, y geología del área de estudio como menciona Montoya (2008).

### 3.4.2 Recolección de la información climatológica

Para poder hacer la modelación, es necesario determinar qué estaciones de precipitación y de caudal serán utilizadas. Para el caso concreto de la cuenca del río Porce (punto de cierre en la estación PP7 Ermitaño), se decidió utilizar 23 estaciones de precipitación, 5 de evaporación y 2 de caudal (Tabla 3-2).

Tabla 3-2. Estaciones utilizadas en la modelación de la cuenca del río Porce

ESTACIÓN METEOROLÓGICA	TIPO DE ESTACIÓN	(1)	SUBCUENCA	ELEVACIÓN Mts	X-Coord.	Y-Coord.
El Astillero	Pluviométricas		Doña María	2.420	1.183.900	823.149
Barbosa	Pluviométricas		Medellín	1.290	1.204.180	861.540
Belmira	Pluviométricas		Chico	2.520	1.222.412	824.161
Fabricato	Pluviométricas		Medellín	2.422	1.195.470	831.500
Caldas	Pluviométricas		Medellín	1.930	1.160.480	828.568
El Convento	Pluviométricas		Medellín	1.580	1.192.500	841.160
Ayurá	Pluviométricas		Medellín	1.750	1.173.830	835.380
Girardota	Pluviométricas		Medellín	1.350	1.197.760	847.680
Amalfi	Climatológica		Riachón	1.500	1.260.100	893.800
Boquerón Amalfi	Pluviométricas		Porce	1.600	1.250.160	898.660
El Mango	Climatológica		Porce	960	1.244.805	881.514
Cruces Anorí	Pluviométricas		Anorí	910	1.283.750	891.800
El Roble	Climatológica		Porce	1.175	1.261.450	883.900
Troneras G-2D	Climatológica		Guadalupe	1.800	1.241.654	870.121
La Sirena	Pluviométricas		Guadalupe	1.925	1.236.730	864.900
Gómez Plata	Pluviométricas		Guadalupe	1.824	1.231.493	872.809
San Bernardo	Pluviométricas		Riogrande	2.740	1.249.900	834.590
San Pedro RG-10 La Ye	Climatológica		Chico	2.340	1.210.390	834.743
Cucurucho	Climatológica		Chico	2.580	1.228.949	840.544
RMS-15 Gabino	Limnigráficas-Pluviométricas		Nechí	1.055	1.217.340	875.250
Santa Rosa	Pluviométricas		Riogrande	2.594	1.226.085	847.320
Dos Bocas Ermitaño	Pluviométricas		Nechí	75	1.315.690	908.460
Madre seca	Pluviométricas		Nechí	650	1.294.210	893.500
PP7 Ermitaño	Limnigráficas		Porce	100	1.300.509	908.620

### 3.4.3 Calibración

La calibración del modelo se lleva a cabo con el fin de encontrar el mejor ajuste del modelo con respecto al comportamiento real; esto permite simular, con cierto grado de precisión,

(que está en función del ajuste logrado en la calibración) no solo la realidad, sino también escenarios futuros (Valencia, 2008). A pesar de que se trata de un modelo de base física, se necesita de parámetros calibradores para su correcto funcionamiento, ya que en muchas ocasiones las variables empleadas en la modelación no representan correctamente la realidad. Por lo tanto, para calibrar el modelo, se cuenta con nueve parámetros diferentes, cada uno interviene en los diferentes procesos que se dan en el esquema conceptual del modelo (Velásquez, 2011). Para la calibración del modelo se utilizaron los datos del caudal en las dos estaciones de aforo.

El proceso de calibración del modelo TETIS consiste en determinar el valor de los parámetros que producen el mejor ajuste a las hidrógrafas observadas aguas abajo (Tabla 3-3). Se estudia particularmente el comportamiento del modelo ante la variación de los parámetros (Céspedes y Camacho, 2004). Se utilizarán los datos de las series de caudal de un año y medio para el proceso de calibración (entre 2004 y 2005).

Todos estos parámetros se seleccionan a partir de una distribución uniforme en un rango físico probable, suficientemente amplio y se realizan con los valores simulados de Monte Carlo. El análisis posterior del comportamiento del modelo permite establecer si existe o no interdependencia paramétrica, identificar los parámetros más sensibles e identificables dentro del modelo y generar las bandas de incertidumbre paramétrica para la serie de caudales estudiada (Céspedes y Camacho, 2004).

Se utilizó el módulo de calibración automática del software TETIS 6.0, usando los valores de caudal del punto de control PP7 Ermitaño y un periodo de calibración, de mayo de 2004 a noviembre de 2005, ya que para este periodo los datos estaban completos. Para certificar que los datos simulados se ajustan a los datos observados, se emplearon el error cuadrático medio RMSE, el coeficiente de eficiencia NSE (Nash y Sutcliffe) y el error en volumen, definido como la diferencia cuadrática entre los volúmenes estimados y los observados, siendo el último el de mayor importancia para los objetivos de este estudio.

**Tabla 3-3.** Factores de corrección obtenidos del proceso de calibración

FACTOR DE CORRECCIÓN	VALOR
Almacenamiento estático	0,03
Evaporación	1
Infiltración	0,27
Escorrentía	0,01
Percolación	2
Flujo subsuperficial	40
Pérdidas	0
Flujo base	600
Velocidad flujo	0,5

### 3.4.4 Validación

La validación del modelo es el proceso de demostrar que se están simulando apropiadamente los procesos físicos dominantes en un sitio específico, siendo capaz de realizar predicciones que satisfagan los criterios de precisión previamente establecidos. Posterior al proceso de calibración, se procede a validar los resultados obtenidos por el modelo, esto se hace comparando los resultados simulados con datos observados.

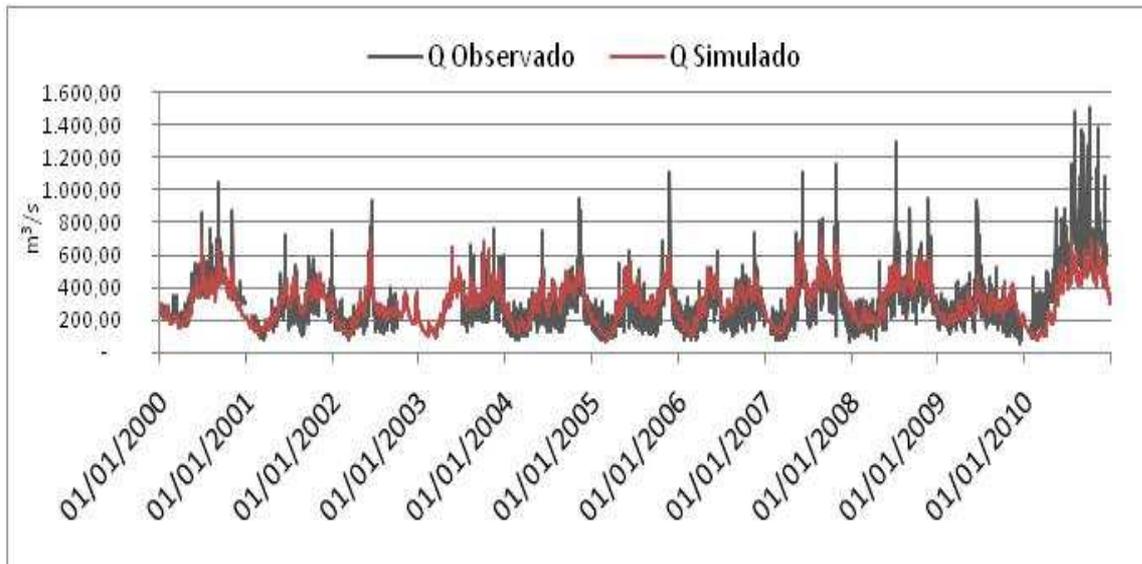
Se realizó validación, tanto temporal como espacial. La primera comparando los datos simulados con los valores medidos de caudal en la estación PP7 Ermitaño, pero para un periodo distinto al de calibración (años 2006-2007); mientras que la validación espacial se realizó comparando los resultados de la simulación con datos de la estación de caudal Puente Gabino.

## 4. Resultados

### 4.1.1 Simulación

La simulación se llevó a cabo para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2000 y el 31 de diciembre de 2010 (Figura 4-1). El coeficiente de eficiencia NSE (Nash y Sutcliffe) es del 46% y el error en volumen es menor al 1%. Se estima un caudal promedio simulado, a la salida de la cuenca, de 307 m<sup>3</sup>/s, lo que corresponde a un volumen de 9,681Mm<sup>3</sup> al año. En el Anexo F, se presentan los caudales simulados para las 31 subcuencas y tramos, que fueron la base para realizar los análisis de sostenibilidad de huella hídrica azul y gris.

Figura 4-1. Caudales simulados para la cuenca del río Porce

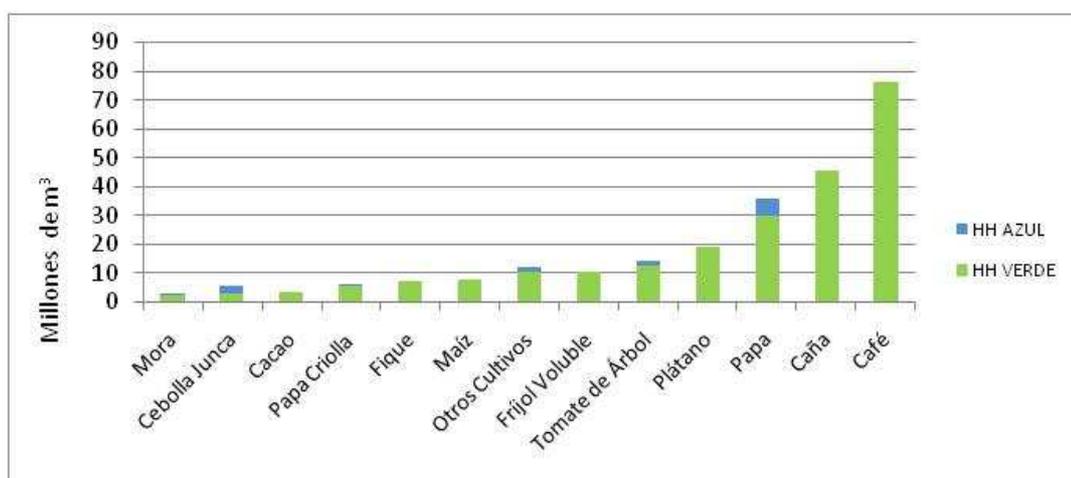


### 4.2 Huella hídrica agrícola en la cuenca del río Porce

La huella hídrica agrícola total de la cuenca es de aproximadamente 250 Mm<sup>3</sup>/año, para el periodo comprendido entre el 2005-2010. De estos, el 93% corresponde a huella hídrica

verde, 5% a huella hídrica azul y el 2% restante a la huella hídrica gris. De los 48 cultivos que se analizaron inicialmente, se priorizaron 11, según su contribución a la HH total; se seleccionaron como prioritarios aquellos cuya HH fuera mayor al 5% de la HH total. La contribución de cada uno de los cultivos presentes en la cuenca del río Porce a la huella hídrica total de consumo (HH verde+ HH azul), se presenta en la Figura 4-2. El café es el cultivo que más aporta a la huella hídrica de consumo con un 31%, seguido de la caña, la papa y el plátano: 19%, 15% y 8 % respectivamente; solo estos cuatro cultivos aportan más del 70% de la huella hídrica del consumo total en la cuenca del río Porce. Esto se debe principalmente a dos razones, la primera es que son cultivos con mucha área cultivada en el área de estudio, y la segunda es que sus rendimientos son bajos lo que aumenta su huella hídrica.

Figura 4-2. Contribución de los diferentes cultivos a la huella hídrica de consumo (HH verde + HH azul).



En términos de huella hídrica verde se presenta un comportamiento muy similar al de la huella de consumo. Lo anterior debido a que la HH verde aporta el 93% de la HH total. En este caso, solo el café, la caña, la papa y el plátano recogen aproximadamente un 75% de la HH verde total agrícola de la cuenca (Figura 4-3). Por otro lado, el cultivo con mayor HH azul es la papa y la cebolla junca, estos dos cultivos aportan el 65% de la huella hídrica azul. El régimen de precipitación presente en la cuenca del río Porce permite que la mayoría de cultivos se desarrollen bajo condiciones de no riego, esto explica en gran medida, la proporción tan alta de HH verde en la cuenca. Por otro lado, aunque la oferta de agua verde es generosa, algunos cultivos, principalmente transitorios y de periodo

vegetativo corto, requieren de riego, lo cual se ve reflejado en los valores de HH azul reportados.

La huella hídrica gris pone de nuevo al café como el cultivo con mayor impacto sobre la cuenca, seguido por la papa; alcanzan un 50% de la huella hídrica gris agrícola total de la cuenca del río Porce. La HH gris proviene de las cantidades de fertilizante usados en el proceso de producción de un cultivo determinado; las prácticas agrícolas utilizadas dentro de la cuenca son las que determinan el comportamiento de la HH gris. Generalmente se fertiliza una vez establecido el cultivo, lo cual explica que cultivos como la papa y otros en su mayoría transitorios, se lleven la mayor proporción de HH gris. Sin embargo, el café, que ocupa el primer lugar en contribución, el plátano, el tomate de árbol y la caña, que son cultivos permanentes, también presentan altos valores de HH gris, debido, principalmente, a que se acostumbra fertilizar después de cada cosecha, 2 a 3 veces en el año. Además, el área cultivada también es un factor que influye de manera directa en la estimación de HH gris en la cuenca del río Porce.

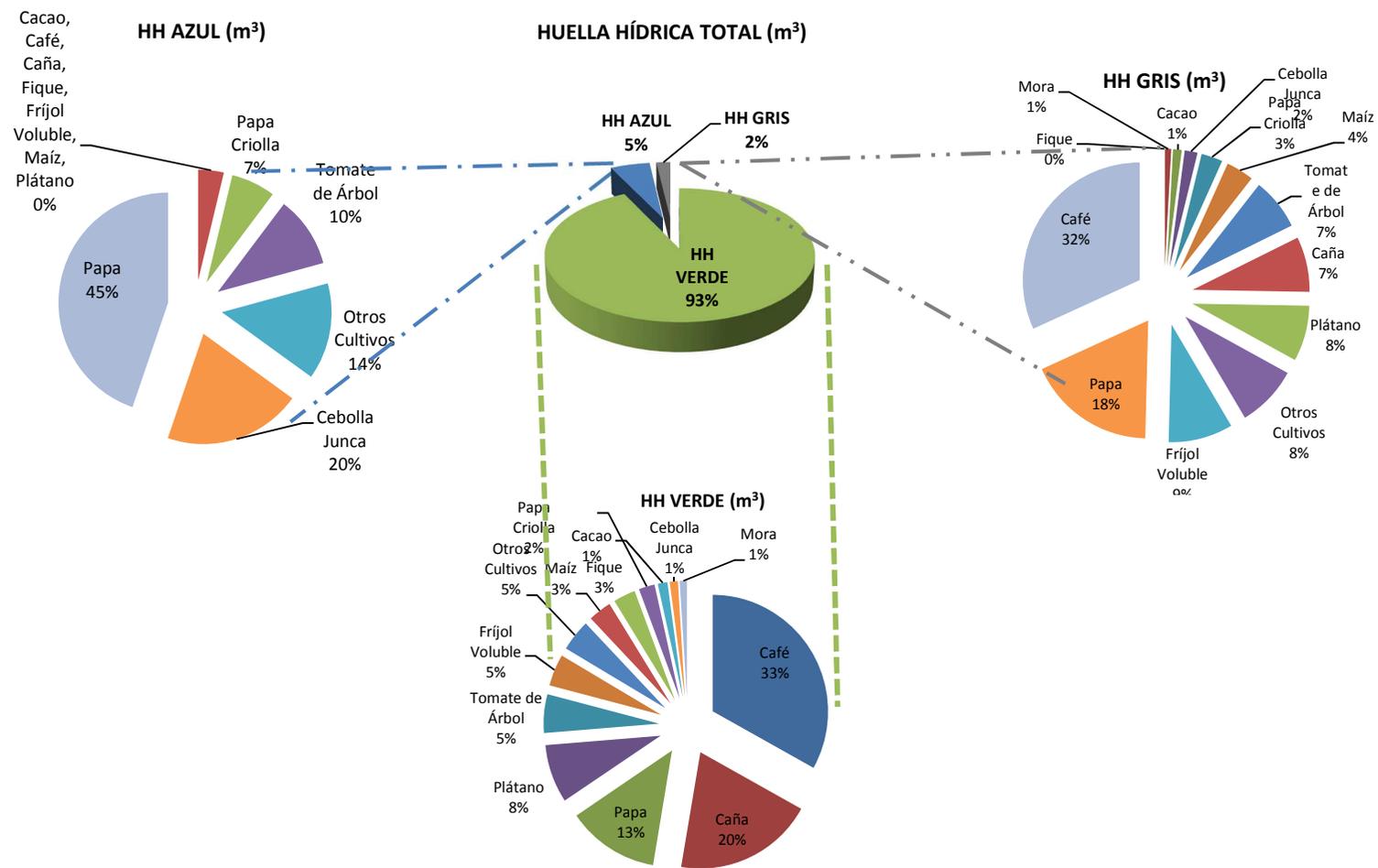


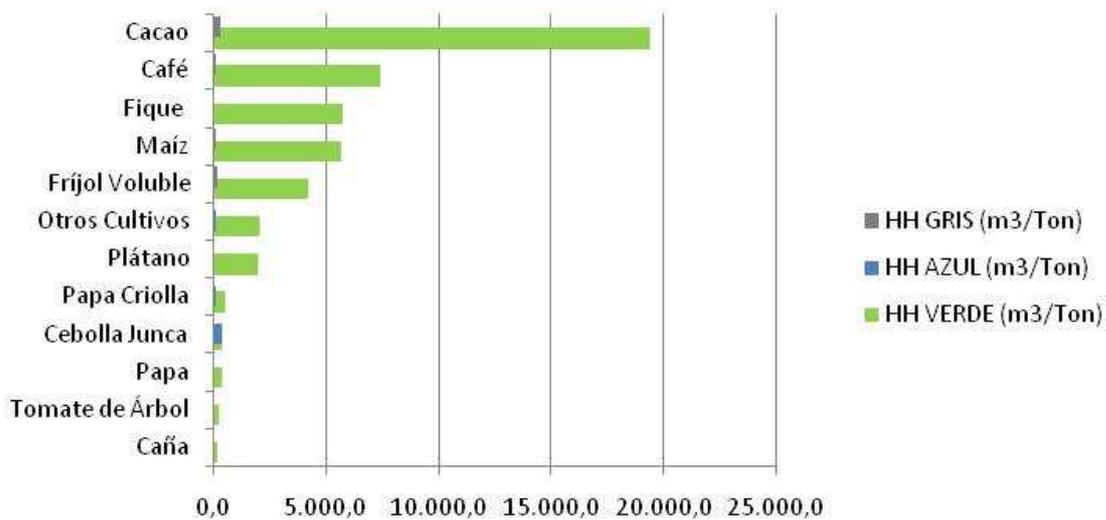
Figura 4-3. Huella hídrica total agrícola anual (azul, verde y gris) en la cuenca del río Porcía

### 4.2.1 La huella hídrica agrícola por tonelada

Es también conocida como el contenido de agua virtual de un cultivo (Zeng *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2009). La huella hídrica promedio, por tonelada producida, difiere significativamente entre cultivos y regiones de producción. Los cultivos con un alto rendimiento o biomasa cosechada, generalmente tienen una huella hídrica más pequeña por tonelada que los cultivos con un rendimiento bajo (Mekonnen y Hoekstra, 2010). Estos valores también pueden considerarse como un indicador de eficiencia: valores más bajos significan un menor consumo de agua por tonelada producida, mientras que valores altos significan lo opuesto.

Los cultivos con una huella hídrica por tonelada mayor, fueron: cacao, café, fique, maíz y frijol. Los que más bajos valores presentaron son: caña, tomate de árbol y papa (Figura 4-4).

Figura 4-4. Huella hídrica por tonelada o contenido de agua virtual (m<sup>3</sup>/ton)

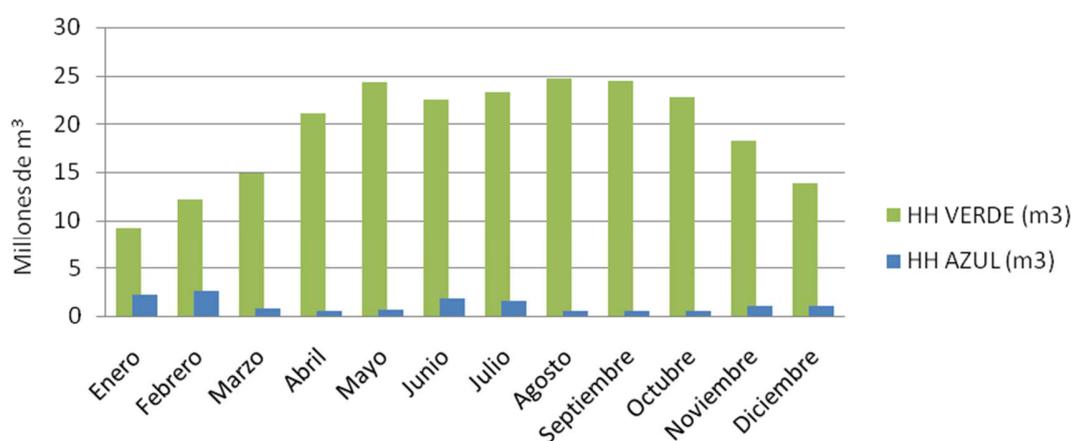


### 4.2.2 Huella hídrica agrícola a escala mensual

Se calculó la huella hídrica de consumo a nivel mensual para toda la cuenca del río Porce (Figura 4-5). Los resultados indican que los meses de mayor consumo de agua en la cuenca son: mayo, agosto y septiembre, los cuales corresponden a los meses más lluviosos del año donde hay pérdidas de agua por evaporación desde espejos libres de agua, suelo saturado y por transpiración de la cobertura vegetal, incrementando la HH

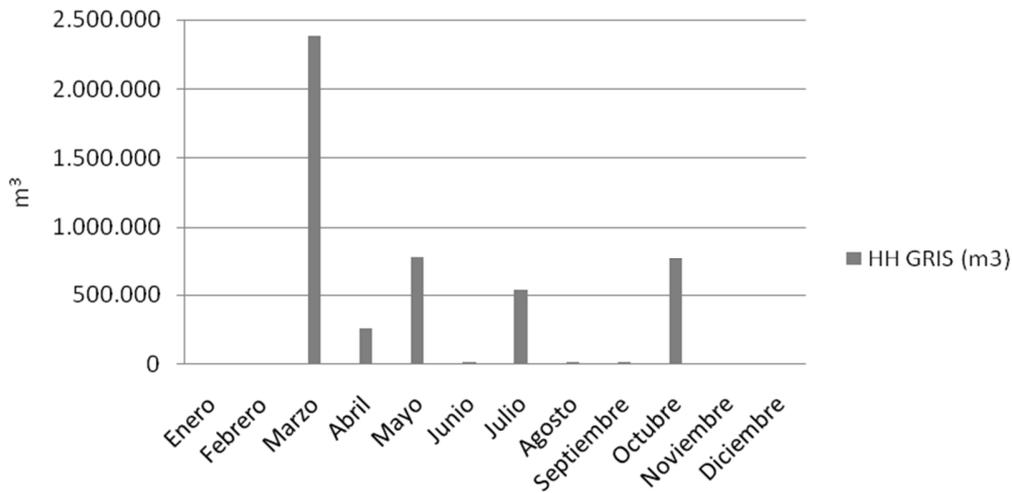
verde. Ésta sigue un comportamiento similar al régimen de precipitación de la lluvia en la cuenca, con máximos en mayo y septiembre, un mínimo absoluto en enero y un mínimo relativo en junio; mientras que la huella azul es mayor en los meses más secos, enero y junio, siguiendo el comportamiento de la evapotranspiración local y en los que se requiere de riego. Lo anterior es de esperarse, ya que la huella verde está en función de la precipitación efectiva y la huella azul depende del déficit de agua controlado principalmente por la evapotranspiración.

Figura 4-5. Huella hídrica verde y azul mensual agrícola de la cuenca del río Porce



La huella hídrica gris igualmente fue calculada a escala mensual (Figura 4-6). Ésta se trata de manera diferente debido a que, por definición, no es una huella de consumo. Las fertilizaciones de los cultivos en la cuenca se realizan cada vez que se establecen nuevos ciclos de siembra en cultivos transitorios, generalmente en marzo y octubre, con el fin de aprovechar las lluvias, a mayor lluvia mayor lixiviación de fertilizantes a los cuerpos de agua, esta es la razón por la cual probablemente se presentan altos valores de HH gris en estos meses. Para cultivos permanentes, como el café y el cacao, la fertilización se realiza de 2 a 3 veces al año, generalmente después de las cosechas. Asimismo, en mayo y julio se presentan valores significativos, debido a que una gran cantidad de cultivos tienen 3 y 5 meses de periodo vegetativo y sus ciclos de siembra y fertilización corresponden precisamente a estos dos meses, es por esta razón que la HH gris es alta en dichos periodos del año, debido a que cuando se fertiliza se contamina el agua por lixiviación.

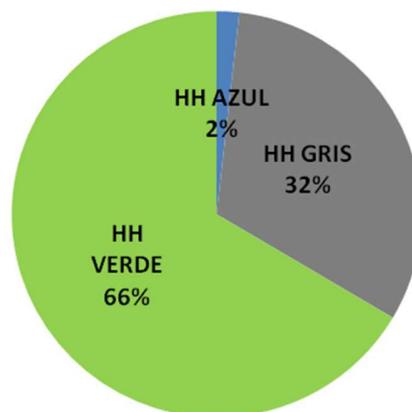
Figura 4-6. Huella hídrica gris mensual de la cuenca del río Porce



### 4.3 Huella hídrica pecuaria en la cuenca del río Porce

La huella hídrica pecuaria de la cuenca del río Porce es de aproximadamente 698 Mm<sup>3</sup>/año, de los cuales el 66% (464 Mm<sup>3</sup>/año) es verde y corresponde a los pastos, el 32% (221 Mm<sup>3</sup>/año) gris y solo el 2% (12 Mm<sup>3</sup>/año) azul (Figura 4-7).

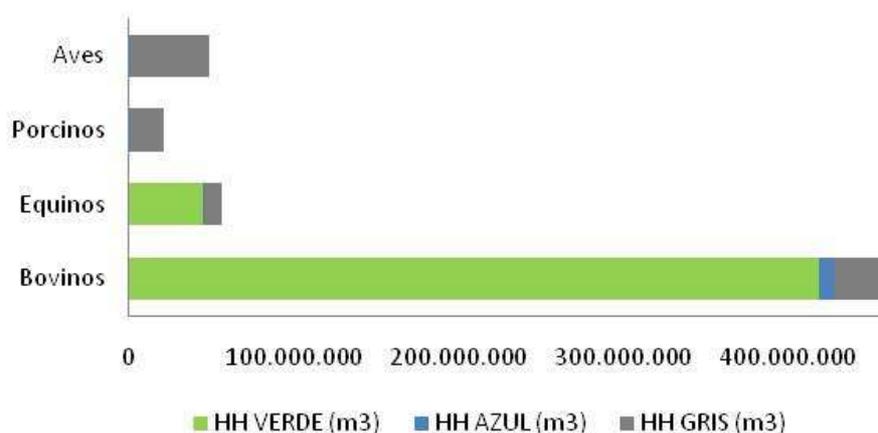
Figura 4-7. Distribución porcentual de la huella hídrica pecuaria en la cuenca del río Porce



Los bovinos son la especie que más contribuye a la huella hídrica total pecuaria de la cuenca del río Porce (más del 80%), seguido por los equinos, aves y porcinos respectivamente (Figura 4-8). Bovinos y equinos son los que más aportan debido,

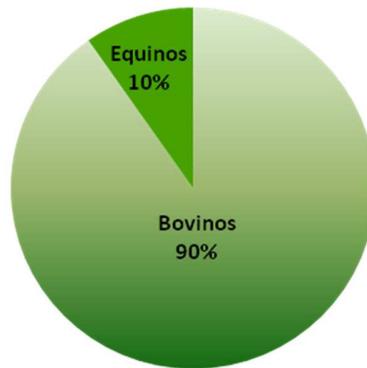
principalmente, a que son los únicos que tienen HH verde y es ésta la de mayor tamaño en la HH pecuaria.

Figura 4-8. Huella hídrica total pecuaria de bovinos, equinos, porcinos y aves



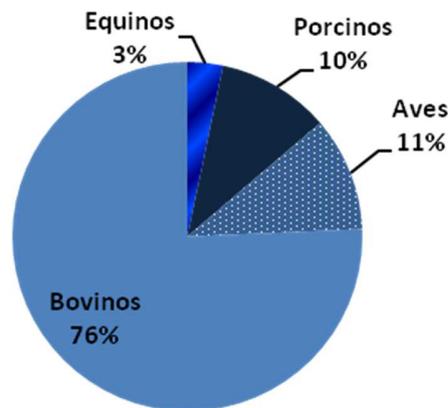
La huella hídrica verde se distribuye entre bovinos ( $419\text{Mm}^3/\text{año}$ ) y equinos ( $45\text{Mm}^3/\text{año}$ ), y corresponde a la huella hídrica de los pastos manejados, utilizados como alimento, tanto para ganadería de leche, carne y doble propósito (Figura 4-9). Los pastos constituyen la mayor parte del área cultivada de la cuenca, alrededor del 80%, según las áreas reportadas en el Anuario Estadístico de Antioquia, lo que demuestra la gran vocación ganadera de la cuenca. Esta actividad se distribuye en las zonas altas (San Pedro, Belmira, Entreríos, Santa Rosa, Yarumal, Don Matías, y la parte alta de los municipios del Área Metropolitana), predominando la ganadería de leche, con cultivos tecnificados e intensivos de pastos; mientras que para las zonas bajas de la cuenca (Porce medio y bajo) se presenta con más frecuencia la ganadería de carne o doble propósito, con cultivos de pastos más extensivos que intensivos. Los equinos se distribuyen uniformemente a través de la cuenca, su huella hídrica verde es baja en comparación con la de los bovinos, debido a que su número de individuos también lo es.

Figura 4-9. Distribución porcentual de la huella hídrica verde total en la cuenca del río Porce



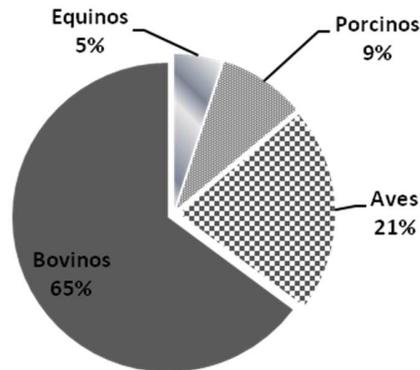
La huella azul pecuaria en la cuenca del río Porce es de (12 Mm<sup>3</sup>/año), de los cuales el 76% (9.4 Mm<sup>3</sup>/año) corresponde a bovinos, 11% (1.31Mm<sup>3</sup>/año) a aves, 10% (1.29 Mm<sup>3</sup>/año) a porcinos y el 3% (0.4 Mm<sup>3</sup>/año) a equinos (Figura 4-9). La HH azul de la producción pecuaria sólo representa una parte marginal de la HH total pecuaria debido a que el ganado en la cuenca es principalmente alimentado con pasto en condiciones de no irrigación o secano, y los consumos de agua directo y de servidumbre no alcanzan a ser significativos comparados con la HH verde. Los bovinos son los mayores consumidores de agua, especialmente aquellos bajo sistemas de producción intensivos. Las aves ocupan el segundo lugar; aunque tienen un bajo consumo de agua individual, sin embargo existen alrededor de 11 millones de aves en la cuenca, entre engorde y postura, lo cual eleva la HH azul. Los porcinos usan la mayoría para consumo; sin embargo, un porcentaje significativo es usado en mantenimiento de porquerizas. Los equinos están en último lugar, su número en la cuenca es relativamente bajo en comparación con los demás componentes del sector pecuario.

Figura 4-10. Distribución porcentual de la huella hídrica azul total en la cuenca del río Porce



La huella gris se comporta similar a la azul en su distribución porcentual (65% bovinos, 21% aves, 9% porcinos, 5% Equinos). Los bovinos ocupan de nuevo el primer lugar, (Figura 4-10). Gran parte de la HH gris de los bovinos se debe a que a ésta se le atribuye la contaminación del nitrógeno aplicado a los pastos a través de las fertilizaciones, las cuales son bastante periódicas, principalmente en ganadería intensiva, aproximadamente cada 2 meses; por otro lado, las heces de bovinos (40 kg/animal/día) contienen cantidades considerables de nitrógeno, las cuales al lixiviarse también contaminan cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Las aves en segundo lugar, contaminan en función de la disposición de sus residuos y aplicación de gallinaza y pollinaza. Los sistemas intensivos de producción avícola pueden crear enormes problemas de polución por las grandes cantidades de sustancias contaminantes (nitrógeno) que se producen (Costa y Urgel 2000, Smith *et al.* 2001). Además, originan grandes volúmenes de estiércol que se depositan en el suelo y, como resultado, éste y el agua se contaminan; asimismo el elevado número de aves en la cuenca contribuye a que su HH sea alta. Los porcinos igualmente, contaminan las aguas, principalmente, por la aplicación de porquinazas como fertilizantes de pastos y cultivos con el fin de aumentar rendimientos sin incurrir en gastos de fertilizantes sintéticos. El análisis de los equinos es similar a los bovinos, solo difieren en el número de individuos; los equinos, por el simple hecho de ser menos, contaminan menos.

Figura 4-11. Distribución porcentual de la huella hídrica gris total en la cuenca del río Porce



### 4.3.1 Huella hídrica pecuaria por tonelada

Los bovinos tienen el mayor contenido de agua virtual, seguidos por los equinos (Tabla 4-1). El agua virtual o HH por tonelada en bovinos y equinos es elevada, en gran parte porque su alimento (pastos) requiere de grandes cantidades de agua para su producción. Cabe resaltar que para porcinos y aves no se tuvieron en cuenta los valores de HH del alimento, debido a que estos son alimentados con concentrados, producidos por el sector industrial, por lo cual no debe cargarse la HH de dichos procesos al sector pecuario.

Equinos y bovinos son criados en la cuenca con pastos sin irrigación, esto explica la gran proporción de agua verde virtual en comparación con la azul. Para los cuatro tipos de ganado, el agua azul es relativamente baja, lo cual está estrechamente relacionado con las prácticas de producción utilizadas; las porquerizas donde se crían cerdos requieren de un manejo constante (lavado de porquerizas), lo que podría explicar por qué los porcinos tienen el mayor contenido de agua virtual azul. Algo similar sucede con los bovinos: gran parte de su producción se realiza de manera intensiva lo cual demanda gran consumo de agua en el mantenimiento de establos y sitios de ordeño; asimismo son los animales de mayor volumen y requieren de grandes volúmenes de agua para satisfacer sus necesidades fisiológicas (65 L/día/animal). Los consumos diarios de agua por parte de las aves son significativos en función de su población total en la cuenca, la cual es elevada (11 millones de aves). Por último, los equinos aunque consumen mucha agua (35

L/día/animal), son pocos dentro de la cuenca y por ello presentan los valores de HH azul por tonelada más bajos.

En términos de huella gris, las aves tienen el mayor contenido de agua virtual, seguido por los porcinos, mientras que equinos y bovinos tienen los valores más bajos. Las aves y porcinos presentan los valores más altos de agua virtual gris debido, en gran parte, a que la gallinaza y la porquinaza son utilizadas ampliamente como fertilizantes orgánicos, con un potencial contaminante alto, especialmente cuando se aplican en suelos saturados de agua, de esta manera se facilita la escorrentía y su llegada a cuerpos de agua; como en la cuenca suele fertilizarse en épocas lluviosas, justo cuando los suelos están a capacidad de campo, se aumenta el riesgo de contaminación.

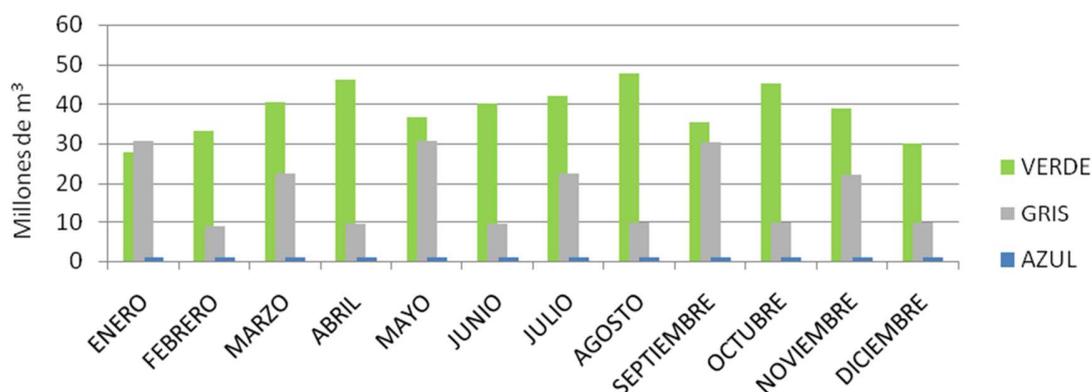
Tabla 4-1. Huella hídrica verde, azul y gris por tonelada (contenido de agua virtual) pecuario de la cuenca del río Porce

<b>Especie</b>	<b>HH verde (m<sup>3</sup>/ton)</b>	<b>HH azul (m<sup>3</sup>/ton)</b>	<b>HH gris (m<sup>3</sup>/ton)</b>	<b>Total</b>
BOVINO	5016	78	460	5553
EQUINO	3685	37	556	4278
PORCINO	-	98	738	836
AVES	-	51	1826	1877

### 4.3.2 Huella hídrica pecuaria mensual

Se calculó, al igual que para el sector agrícola, la huella hídrica de consumo, a nivel mensual, para toda la cuenca del río Porce (Figura 4-12). Los resultados indican que los meses de mayor consumo de agua en la cuenca son abril, agosto y octubre, para la HH verde. Ésta, como es de esperarse, sigue un comportamiento similar al régimen de precipitación de la lluvia en la cuenca; la huella azul es más o menos constante durante todo el año, mientras que la huella hídrica gris, presenta picos cada dos meses, debido a que se fertilizan los pastos que constituyen el alimento principal para bovinos y equinos.

Figura 4-12. Huella hídrica verde, azul y gris mensual pecuaria de la cuenca del río Porce



## 4.4 Análisis de sostenibilidad ambiental

El análisis se realizó para las 31 cuencas o tramos definidos anteriormente. Se estableció una escala de valores para definir el nivel de criticidad de cada una de ellas, tipo semáforo, en función del índice de escasez de agua verde y de agua azul, y el nivel de contaminación del agua; si este valor es mayor a 1 durante 3 meses o menos, la cuenca se califica como normal y se denota con el color verde; de 3 a 6 meses con valores de índice de escasez mayores a 1, se considera en estado medio y color amarillo; cuencas o tramos con índices de escasez de agua verde mayores a 1, en más de 6 meses, son críticas y se le asigna un color rojo (Anexo E).

### 4.4.1 Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica verde

Las subcuencas de los tramos Porce medio, Porce medio bajo y Porce bajo (cuenca total del Porce), presentan problemas de disponibilidad de agua verde para las actividades agrícolas y pecuarias actuales, en un nivel medio, en el escenario de protección actual, y las subcuencas del Mata y el Aburrá tienen niveles críticos. Por otro lado, para el escenario de zonificación ambiental, las subcuencas de los ríos Aburrá y Mata no tienen agua verde disponible y la sostenibilidad de su huella hídrica verde es crítica para las actividades agrícolas y pecuarias, así mismo, los tramos Porce medio y Porce medio bajo (Figura 4-13).

En la cuenca del río Aburrá tienen lugar la mayor cantidad de cultivos reportados por los anuarios estadísticos de Antioquia (aproximadamente el 48 % del café que se encuentra en toda la cuenca del río Porce está sembrado en dicha zona, igual que el 40% de la caña, el 97% de la cebolla junca y el 57% del plátano). Los requerimientos de agua verde de cultivos y pastos son los más altos (si no se tiene en cuenta el área, es decir en milímetros), lo cual contribuye a que su huella hídrica verde sea alta, además, presenta grandes áreas no productivas, debido a que en ella se concentra la mayor población de la cuenca, lo que se traduce en menor área para el desarrollo de las actividades agrícolas y pecuarias y una menor disponibilidad de agua verde.

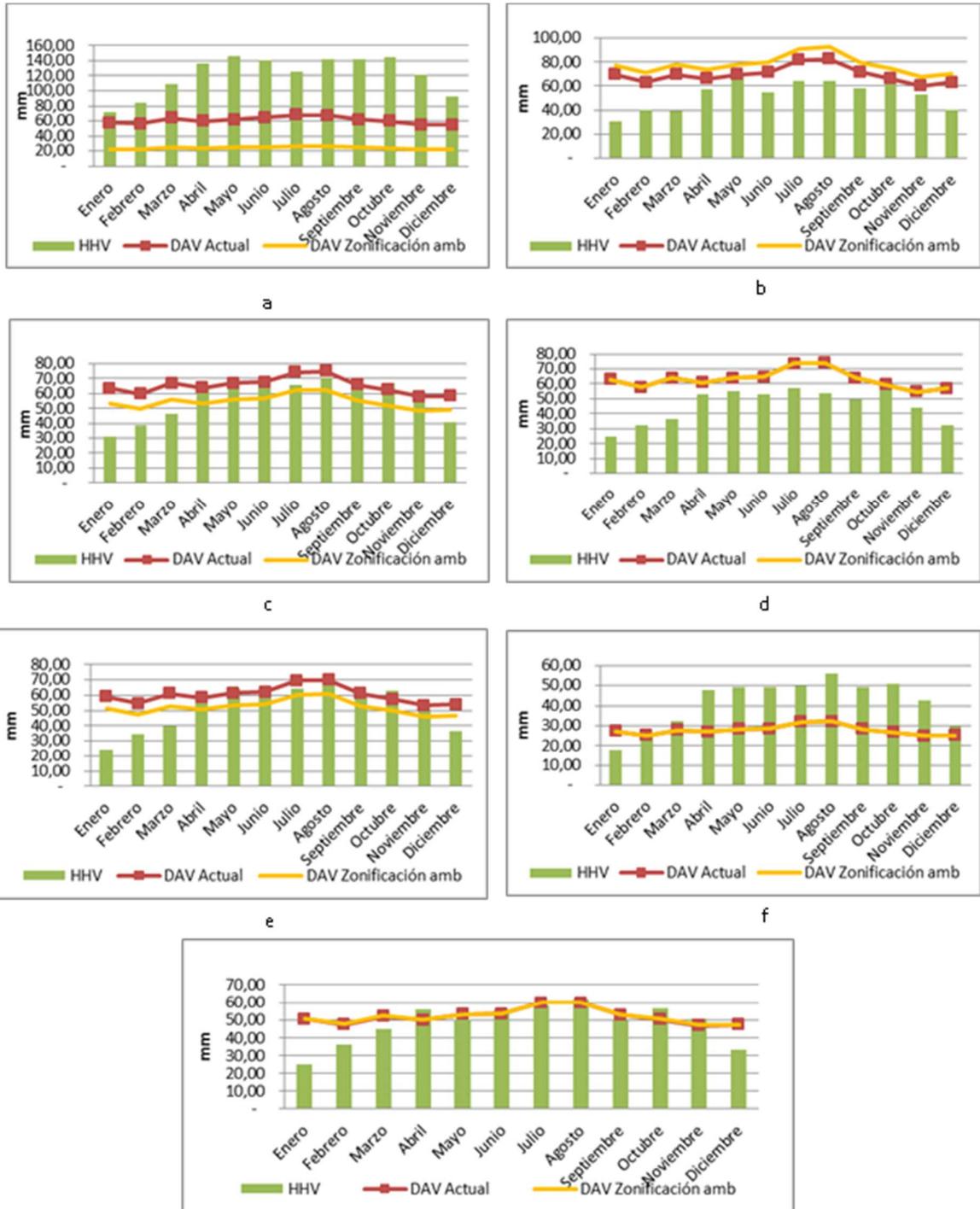
Los tramos Porce medio y Porce medio bajo acumulan la huella hídrica verde de las cuencas, aguas arriba de ellos, asimismo, acumulan las áreas de protección y no productivas para los distintos escenarios de protección planteados. Bajo un escenario de protección actual, la cuenca, hasta los tramos Porce medio y Porce medio bajo, no tendría el agua verde suficiente para satisfacer las necesidades del sector agrícola y pecuario, durante 4 meses en el año (abril mayo, septiembre y octubre) que corresponden a los meses de mayor precipitación; mayores pérdidas de agua por evaporación, desde espejos libres de agua; suelo saturado y por transpiración de la cobertura vegetal, lo cual incrementa la HH verde y reduce la disponibilidad de agua verde. Bajo el escenario de zonificación ambiental, las áreas en protección son aún más grandes. Pasan de 23%, en el escenario actual, a 35% en el escenario de zonificación ambiental. Lo anterior reduce la disponibilidad de agua verde para cultivos y pastos y lleva a una insostenibilidad de estas actividades en este territorio; donde el índice de escasez de agua verde supera el valor 1, en 8 meses del año. Así pues, si se llegara a la condición ideal de conservación, es decir, la zonificación ambiental, no habría agua verde disponible para sostener las actividades agrícolas y pecuarias actuales.

En el caso de la HH verde, el tramo Porce bajo acumula toda huella hídrica verde la cuenca del río Porce (en sentido hidrológico); de la misma manera acumula las áreas en protección y las áreas no productivas. A este punto, considerando toda la extensión, la disponibilidad de agua verde se encuentra en un nivel medio para ambos escenarios (actual y de zonificación ambiental); la huella hídrica verde supera la disponibilidad de agua verde, en 5 meses del año, tanto en de protección como en el de zonificación; Sin embargo, se debe aclarar que para el escenario zonificación ambiental solo se tiene información de los planes

de ordenación y manejo de las cuencas de los ríos Aburrá y Grande. Es posible que si se realizara el ejercicio de zonificación ambiental para las demás subcuencas que conforman la cuenca del río Porce, estas áreas de conservación y protección aumenten, disminuyendo la disponibilidad de agua verde podrían presentarse conflictos de uso entre las actividades agropecuarias y las zonas de protección. Por otro lado, aunque solo se supera el valor 1 del índice de escasez de agua verde en 5 meses del año, los demás meses tienen valores bastantes cercanos a 1, por lo cual, aunque se presentan niveles medios de disponibilidad de agua verde, estos están cercanos a valores críticos.

Por otro lado en términos de huella hídrica verde, las cuencas de los ríos Grande y Guadalupe se comportan de manera muy similar y no tienen problemas de disponibilidad de agua verde. El índice de escasez de agua verde no sobrepasa, en ningún mes del año, el valor de 1. Sin embargo, está muy cerca de alcanzarlo en los meses de mayo y octubre, correspondientes a las épocas más húmedas del año, en donde se presentan mayores pérdidas de agua por evaporación, desde espejos libres de agua; suelo saturado y por transpiración de la cobertura vegetal. De ahí que, en los casos de grandes precipitaciones, la evaporación y evapotranspiración es máxima, incrementando la HH y disminuyendo la disponibilidad de agua verde.

Figura 4-13. Comparación entre la huella hídrica verde mensual y la disponibilidad de agua verde mensual (DAV) actual. a: cuenca del río Aburrá, b: cuenca del río Grande, c: cuenca del río Porce medio, d: cuenca del río Guadalupe, e: cuenca del río Porce, f: cuenca del río Porce medio bajo, g: cuenca del río Porce.

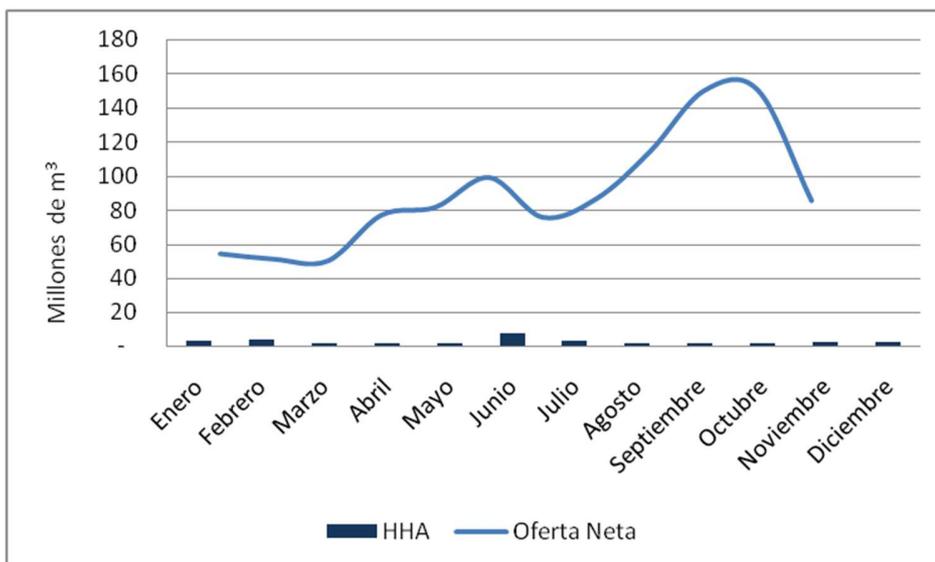


#### 4.4.2 Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica azul

La huella hídrica total azul en una cuenca es igual a la suma de todas las huellas hídricas azules de las actividades que tienen lugar dentro de la cuenca, en este caso solo se analizan las actividades agrícolas y pecuarias. La huella hídrica azul en un período definido, meses en este caso, y en una cuenca específica, constituye un Hotspot cuando ésta supera la disponibilidad de agua azul (Hoekstra *et al.*, 2011). Es importante aclarar que en este aparte se habla de disponibilidad en términos de cantidad y no de calidad, por lo que los resultados aquí expuestos se refieren al volumen de agua requerido para satisfacer una necesidad de alguna actividad, para el caso de esta investigación la agrícola y pecuaria.

En términos generales la cuenca del río Porce y todas la subcuencas que la conforman, tienen la capacidad de satisfacer la demanda de agua azul por parte de los sectores que demandan el recurso (agrícola, pecuario). El índice de escasez de agua azul para toda la cuenca no sobrepasa el valor 1 (el índice de escasez es inferior a 0.020) para ningún mes del año y se mantiene siempre por debajo del 5%, lo cual quiere decir que la cuenca tiene 20 veces más agua que la consumida por los sectores que se mencionan (Figura 4-14).

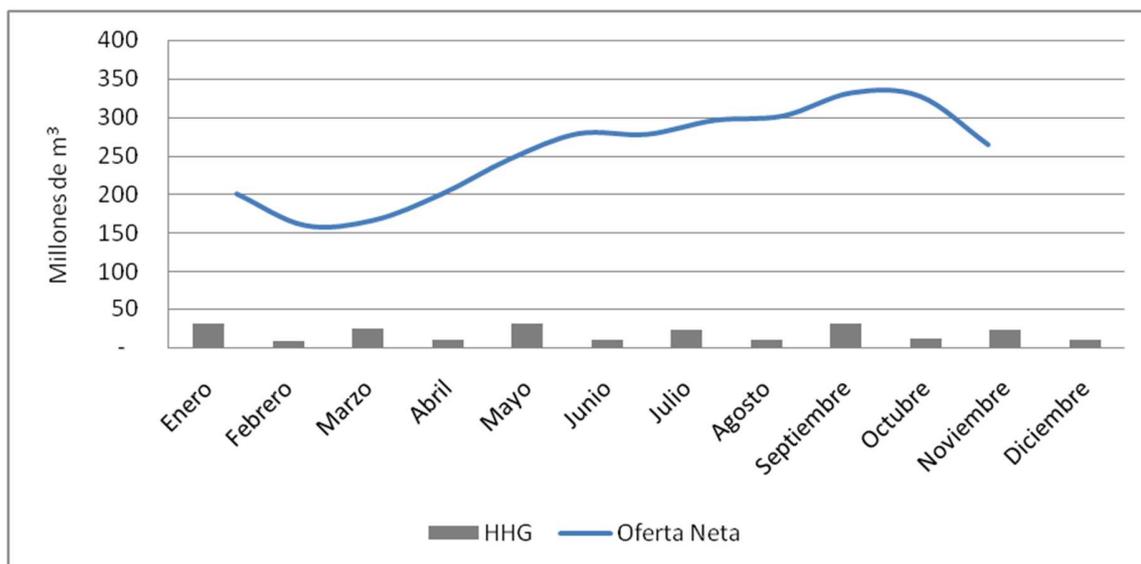
Figura 4-14. Huella hídrica azul versus oferta de agua azul neta de la cuenca del río Porce



### 4.4.3 Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica gris

En términos de huella hídrica gris, la cuenca también tiene un comportamiento uniforme. La actividad agrícola y ganadera, principalmente intensiva; el uso de fertilizantes químicos y porcinaza; y las grandes extensiones de cultivos, contribuyen al incremento de la HH gris. El nivel de contaminación del agua (NCA) de la cuenca del río Porce es de 0.026, lo cual significa que tiene el volumen suficiente para diluir las cargas de nitrógeno producto de las actividades agrícolas y pecuarias que tienen lugar dentro de ella. No obstante, estos resultados no reflejan el estado de la calidad del agua por sí solos, en este estudio solo se tiene en cuenta uno de los contaminantes asociados a dos sectores productivos; sin embargo en la cuenca tienen lugar más sectores, como el industrial, el doméstico, el minero, entre otros, que generan contaminantes adicionales al nitrógeno, que fueron tenidos en cuenta para esta investigación y que pueden tener efectos mayores en la afectación de la calidad del agua de la cuenca (Figura 4-15).

Figura 4-15. Huella hídrica gris versus oferta natural de la cuenca del río Porce



## 5. Discusión

Las proporciones de HH total en la cuenca del río Porce se comportan según las tendencias nacional y mundial; aunque hay diferencias importantes en los modelos aplicados y supuestos, hay concordancia en el papel dominante del agua verde en la producción agrícola, a escala de cuenca, nacional y mundial. Una comparación de las estimaciones halladas aquí, con estudios anteriores, mostró que el orden de magnitud es similar en todos los estudios. A nivel nacional WWF (2012) encontraron valores de HH total agrícola para Colombia, distribuidos en: 88% verde, 7% azul y el restante 5% gris, valores similares a los encontrados en el presente estudio (93% verde, 5% azul y 2% gris). Las diferencias en la proporción de HH azul y gris pueden ser porque en la cuenca del río Porce no se encuentran áreas significativas bajo el cultivo de arroz, mientras que en el estudio nacional este solo cultivo representa más del 40% de la HH azul agrícola de Colombia y un 20% de la HH gris total. Por otro lado, a nivel global Mekonnen y Hoekstra reportan una huella hídrica relacionada con la producción agrícola, para el período 1996– 2005, de 7404 mil millones de metros cúbicos por año (78% verde, 12% azul, 10% gris)., Liu *et al.* (2009), hallaron una contribución de la HH verde del 84% a la HH agrícola mundial, el restante 16% corresponde a la HH azul, la HH gris no fue tomada en cuenta en este estudio. Siebert y Doll (2010) así mismo, reportan una distribución porcentual de la huella hídrica similar a nivel global, aunque la HH gris tampoco fue considerada.

La huella hídrica en m<sup>3</sup>/ton también fue comparada con los estudios que reportaban este indicador (Tabla 5-1), el cual es conocido como *contenido de agua virtual* (VWC). Estos valores son afines a los encontrados por Mekonnen y Hoekstra (2010), los cuales, para la región de Antioquia, (donde se encuentra situada la cuenca del río Porce) estimaron la HH verde, azul y gris para diferentes cultivos de la base de datos FAOSTAT (Tabla 1).

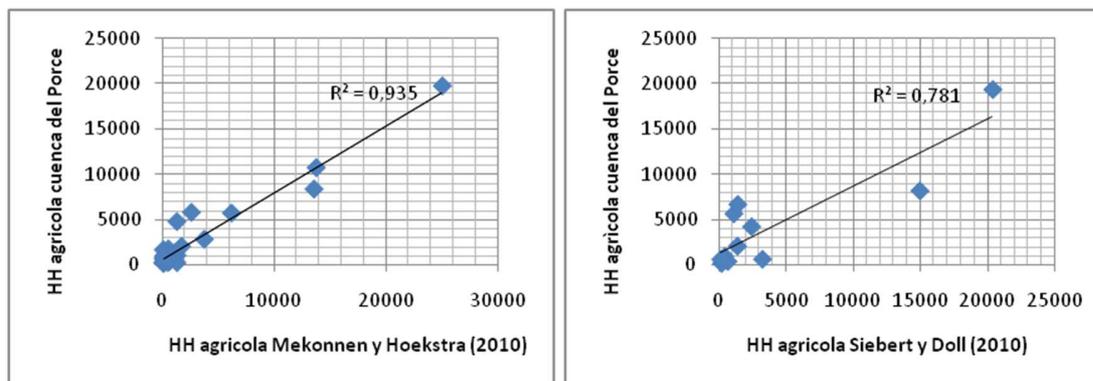
Tabla 5-1. Huella hídrica por tonelada estimada para la cuenca del río Porce y para Antioquia (Mekonnen y Hoekstra, 2010).

Cultivo	HH verde (m <sup>3</sup> /ton) Porce	HH azul (m <sup>3</sup> /ton) Porce	HH gris (m <sup>3</sup> /ton) Porce	HH verde (m <sup>3</sup> /ton) Mekonnen y Hoekstra (2010)	HH azul (m <sup>3</sup> /ton) Mekonnen y Hoekstra (2010)	HH gris (m <sup>3</sup> /ton) Mekonnen y Hoekstra (2010)
Caña	207	-	2	143	1	1
Tomate de Árbol	248	31	7	152	-	-
Papa	390	78	11	248	-	53
Cebolla Junca	402	431	13	226	1	32
Papa Criolla	578	105	16	-	-	-
Plátano	2.051	-	39	1.450	-	7
Frijol Voluble	4.269	-	187	2.546	-	66
Maíz	5.696	-	141	2.464	-	177
Fique	5.756	-	-	-	-	-
Café	7.460	-	c147	12.265	-	1.283
Cacao	19.428	-	346	24.264	-	707
Promedio	4.226	59	82	4.862	1	258

En promedio, la cuenca del río Porce tiene una huella hídrica de consumo (azul+verde) por tonelada de 4367 m<sup>3</sup>/ton, mientras que para los mismos cultivos estos autores reportan valores, promedio para Antioquia, de 5120 m<sup>3</sup>/ton. Asimismo, los valores encontrados por Siebert y Doll (2010) a escala global, para los cultivos que se encuentran en la cuenca del río Porce, están 11 % por debajo de los resultados aquí encontrados.

La huella hídrica total de consumo, estimada en el presente estudio, concuerda muy bien con las estimaciones de Mekonnen y Hoekstra (2011), con un valor de  $r^2$  de 0,96  $p < 0.05$  y razonablemente bien con las estimaciones hechas por Siebert y Doll (2010) con un  $r^2$  de 0.78  $p < 0.05$  (Figura 5-1). La línea de tendencia casi se ajusta a la línea 1:1 para los datos de Mekonnen y Hoekstra (2011).

Figura 5-1. Comparación de los resultados de HH de consumo de la cuenca del río Porce con Mekonnen y Hoekstra (2010) y Siebert y Doll (2010).



Aunque los valores están dentro del mismo orden de magnitud, las diferencias entre ellos podrían deberse a diferencias en los valores de rendimiento del cultivo, usados en los diferentes estudios; a la escala y las condiciones climáticas; en este estudio se tomaron datos de rendimientos y climas locales, mientras que Mekonnen y Hoekstra (2010) y Siebert y Doll (2010) usaron bases de datos globales, lo cual proporcionan, a los resultados aquí encontrados, una mejor resolución.

A nivel de cuenca hidrográfica, Mekonnen y Hoekstra (2011), también calcularon la huella hídrica de la cuenca del río Magdalena, de la cual hace parte la cuenca del río Porce, y encontraron que la HH se distribuye en: 90% verde, 6% azul y 4% gris; esta distribución porcentual se ajusta bastante a la encontrada para la cuenca del río Porce. Zeng *et al.* (2012), hallaron valores de huella hídrica, en  $m^3/ton$ , para 11 cultivos en la cuenca del río Heihe en China; sin embargo, los valores de huella hídrica encontrados en el presente estudio difieren sustancialmente, principalmente en las condiciones climáticas de ambos lugares: mientras que la cuenca del río Heihe se encuentra en una región árida y semi-árida con alta capacidad potencial de evaporación, la cuenca del Porce se encuentra bajo condiciones climáticas en las que la evapotranspiración promedio no supera a la precipitación en la mayor parte del año. Por otro lado, la proporción entre las huellas verde y azul, en la cuenca del Heihe, no tiene el mismo comportamiento que las proporciones a escala global; su HH azul es del 45 %, más alta que el promedio de HH azul de los cultivos reportado por Mekonnen y Hoekstra (2011) de 12%, y el 19% reportado por Liu *et al.* (2009). Lo anterior se debe a que es una cuenca situada en las zonas áridas y semi-áridas

del noroeste de China; las altas temperaturas implican una mayor evapotranspiración y altos requerimientos de agua, mientras que las bajas precipitaciones conducen a una alta dependencia de riego, aumentando su huella hídrica azul.

Pimentel *et al.* (2004) y Mekonnen y Hoekstra (2011), reportaron una huella hídrica avícola de 3.500 m<sup>3</sup>/ton y 3858 m<sup>3</sup>/ton respectivamente, valores 46% y 51% más elevados que la estimación aquí realizada. Algo similar sucede en el caso de la HH porcina, en este caso la HH porcina reportada por Pimentel *et al.* (2004) y Mekonnen y Hoekstra (2011) se encuentra 6 veces por encima de lo hallado en el presente estudio. El valor de la huella hídrica bovina aquí presentado, asimismo, está muy por debajo del promedio mundial (Mekonnen y Hoekstra, 2011; Chapagain y Hoekstra, 2004; Pimentel *et al.*, 2004; De Fraiture *et al.*, 2007; Zimmer y Renault, 2003). Estos valores significativamente inferiores a los reportados en los demás estudios se explican debido a que para el presente estudio se tuvo en cuenta únicamente a la HH de los pastos, como la HH del alimento, mientras que la mayoría de estudios encontrados en la literatura, tienen en cuenta además de la HH de pastos, aquella producto de la fabricación de concentrados usados como alimento. Debido a lo anterior, los valores están significativamente disminuidos.

Por otro lado, cuando se mira la distribución porcentual de la huella hídrica pecuaria, se encuentra que 66% de ésta en la cuenca del río Porce es verde, 32% gris y solo el 2% azul, resultados que se ajustan a lo encontrado por Zonderland y Ledgard (2012) para el sector bovino de Nueva Zelanda (72% verde, 27%, 1% azul), para bovinos alimentados con pastos sin regadío. Por otro lado, Zeng *et al.* (2012) encontraron distribuciones significativamente superiores (92% verde, 8% azul), sin embargo, la HH gris no fue tomada en cuenta en este estudio; Mekonnen y Hoekstra (2012), durante el período 1996-2005, estimaron la huella hídrica total de la producción animal (87,2% verde, 6,2% azul y el 6,6% gris) proporciones también mayores a las encontradas en el presente estudio. No obstante, todos los estudios analizados, concuerdan en que la huella hídrica verde es la de mayor importancia en la actividad pecuaria. Es importante señalar que la huella hídrica verde pecuaria es dos veces más grande que la huella hídrica verde agrícola (232 Mm<sup>3</sup>/año y 434 Mm<sup>3</sup>/año), lo cual no corresponde con las estimaciones de HH a escala global agrícola y pecuaria y a nivel de cuenca de estudios anteriores (Mekonnen y Hoekstra 2011; Chapagain y Hoekstra, 2004; Zeng *et al.* 2012), en donde ocurre exactamente lo contrario; empero, el uso del suelo, principalmente en las partes altas de las cuencas, que conforman

la cuenca del río Porce, es básicamente de actividad pecuaria, específicamente pastos, intensivos hacia las zonas altas y extensivos hacia las partes bajas (CORANTIOQUIA, 2004), por lo cual este resultado es de esperarse.

Con el fin de tener una idea del tamaño de la huella, se debe comparar la huella hídrica de la cuenca, o espacio geográficamente delimitado, con los recursos de agua dulce disponibles (Hoekstra *et al.*, 2011). Se pueden identificar los puntos críticos “Hotspots” de una cuenca hidrográfica en función de los componentes que se localizan en ella, donde se consume o se contamina agua a costa de la calidad de los ecosistemas naturales. En este nivel, el impacto de la “Huella Hídrica” de un producto, un consumidor o un productor, siempre dependerá de la suma de las huellas hídricas de todas las actividades, en este caso agropecuarias, en relación con los recursos disponibles de agua y su capacidad de asimilación (Sotelo *et al.*, 2010).

La cuenca el río Porce tiene suficiente agua para satisfacer los requerimientos de agua azul de la actividad agrícola y pecuaria, más de 100 veces; este resultado fue validado con los valores de oferta y disponibilidad de los planes de ordenamiento y manejo de cuencas existentes dentro de la cuenca del Porce y coinciden con los aquí hallados. Sin embargo, este uso no es el único que se presenta: existen actividades industriales, mineras, energéticas y domésticas que pueden tener consumos de agua azul más elevados, y que requerirían un análisis de sostenibilidad ambiental que tuviera, como consumo de agua azul real, la suma de los consumos de agua azul de cada actividad presente en la cuenca. Asimismo, la carga contaminante producida por las actividades agrícolas y pecuarias es bien asimilada por la oferta de caudal de la cuenca el río Porce. No obstante, solo se evaluó un contaminante, el N, ignorando otros contaminantes importantes como, el fósforo (P), y los sólidos suspendidos totales (SST) que también se derivan de este tipo de actividad. Por otro lado, existen otro tipo de actividades dentro de la cuenca, distintas a la agropecuaria, que puede contribuir aún más a la HH gris y que no se estén viendo reflejadas en este estudio. Un ejemplo de esto, es que para la cuenca del río Aburrá, la calidad de agua está en un nivel crítico (REDRIO, 2011), mientras que para los resultados de este estudio, tiene la capacidad de asimilación del contaminante analizado, lo cual se debe a que en esta investigación, solo se evalúa la contaminación producto de actividad agropecuaria.

A nivel de cuenca no se conoce ningún estudio que haya realizado análisis de sostenibilidad para cada una de las HH. Esta carencia hace que los resultados obtenidos sean difíciles de validar y comparar; estudios como los de Hoekstra *et al.* (2012) y Zeng *et al.* (2012) son los primeros en estimar la sostenibilidad ambiental de la HH, a escala mensual, mediante el uso de estimaciones de huella hídrica azul (uso consuntivo de los flujos de aguas subterráneas y superficiales), la contabilización de los flujos necesarios para mantener las funciones ecológicas fundamentales (caudal ecológico) y considerando valores mensuales en lugar de anuales, con el fin de poner en evidencia posibles déficits de agua, que a una escala anual quedarían enmascarados. Sin embargo, solo lo hacen para la huella azul, ignorando por completo la HH verde que representa la mayor proporción de la HH total a todas las escalas de análisis (Chapagain y Hoekstra 2004; Mekonnen y Hoekstra, 2011; Siebert y Doll, 2010; Liu *et al.*, 2009; Falkenmark, 2006).

Debido a que el agua azul es considerada como el recurso de mayor importancia económica (sector industrial, doméstico, energético, minero, entre otros) se presta poca atención al papel del agua verde en el sostenimiento de la generación de los ecosistemas terrestres. Pero, recientemente, la sociedad se ha dado cuenta de que depende, en gran medida, del buen funcionamiento de los ecosistemas, razón por la cual ya no es suficiente tener en cuenta solo las necesidades de los sectores productivos para garantizar el desarrollo económico de una región, sino también las necesidades y requerimientos de agua por parte de los ecosistemas presentes (Rockstrom y Gordon, 2001).

A menudo, la evapotranspiración puede cambiar significativamente durante ciertos períodos del año, y dado que es uno de los principales procesos controladores del ciclo hidrológico, un aumento o reducción de la misma, tendría efectos respectivamente en la escorrentía. Los ecosistemas terrestres están interactuando directamente con la producción de escorrentía: cuanto mayor sea la proporción de lluvia infiltrada que es consumida por las plantas y los árboles, menos queda disponible para generar escorrentía o recarga de aguas subterráneas (Calder 2004). La vegetación natural, principalmente bosques, afecta el ciclo hidrológico de dos formas: influye en la permeabilidad del suelo y, por lo tanto, en la infiltración de la lluvia, así como en la absorción de agua verde en la zona radicular. Esto significa que una huella hídrica verde puede afectar de manera directa la disponibilidad de agua azul (Hoekstra *et al.*, 2011).

El análisis de sostenibilidad ambiental realizado, muestra puntos críticos o Hotspots ambientales, únicamente en la huella hídrica verde (14 de las 31 subcuencas en las que se dividió la cuenca del río Porce presentan índices altos de escasez de agua verde en al menos un mes del año); de ahí la importancia de su evaluación y estudio. Este análisis indica que existe un gran consumo de agua verde por parte de las tierras dedicadas a cultivos en la cuenca del río Porce, que podrían, a un plazo aún desconocido, disminuir los recursos de agua azul para los seres humanos y los ecosistemas aguas abajo, así como una pérdida de ecosistemas naturales por la expansión de la frontera agrícola, lo cual hace insostenible esta actividad desde el punto de vista de la huella hídrica verde.

A pesar de esto, aún no se conoce, con certeza, cuánta área debe ser reservada para el sostenimiento de los ecosistemas naturales, lo que podría ser un campo para futuras investigaciones. Actualmente se cuenta con las zonificaciones ambientales de los planes de ordenamiento y manejo de cuencas, pero estos son escasos. No obstante, este estudio presenta un primer acercamiento a la planificación y cambia la mirada tradicional de los recursos naturales.

Como se mencionó anteriormente, esta investigación, bajo el conocimiento del autor, está entre los primeros estudios de huella hídrica a nivel de cuenca en el mundo, asimismo, no se conocen reportes de este tipo a nivel del continente americano, ni dentro de los trópicos. Debido a lo reciente del tema y a que la metodología está aún en desarrollo, se presentan varias incertidumbres en el método de cálculo, principalmente se deben a los datos de entrada, los algoritmos y parámetros del modelo y a otras hipótesis de modelización, y cuya disminución debe ser objeto de futuras investigaciones.

## 6. Lineamientos de manejo

Los resultados de este estudio concuerdan con la mayoría de los hallados en los estudios de huella hídrica hallados diferentes escalas de análisis (global, regional, local), en que la mayor proporción de la huella hídrica de la agricultura y la ganadería corresponde a la HH verde. Debido al papel preponderante que tiene el agua verde en la cuenca el río Porce, los lineamientos de manejo del recurso hídrico, deben ser direccionados a la misma. Alrededor del mundo, la comunidad científica se está dando cuenta de la necesidad de incluir los flujos de agua verde en el manejo integrado de recursos hídricos. Este estudio provee diferentes alternativas de manejo de agua, principalmente verde, distintas a la visión tradicional de la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) la cual se enfoca en el agua azul.

La huella hídrica de un cultivo puede reducirse de dos maneras: disminuyendo el requerimiento de agua del cultivo o aumentando el rendimiento del cultivo. Sin embargo, es imposible llevar la huella hídrica de las actividades agrícolas a cero. En general, el 50% o más de la precipitación se pierde como agua no productiva (evaporación directa) (Falkenmark y Rockstrom, 2005). Existen opciones de manejo para reducir esta pérdida, a través del manejo integrado de suelos y aguas, especialmente centrado en el manejo de la fertilidad del suelo, cosecha, labranza del suelo para mejorar la infiltración de la lluvia y el agua, con el fin de mejorar significativamente los rendimientos y la productividad del agua. En otras palabras, se debe maximizar la fracción de precipitación efectiva o productiva. Pretty y Hine (2001), muestran una amplia evidencia que indica que para cultivos en secano los rendimientos se pueden duplicar a través de innovaciones en el suelo, cultivo y manejo del agua. El manejo integrado del suelo y agua puede reducir la HH verde en alrededor del 30% (Falkenmark y Rockstrom, 2004).

El consumo de agua más elevado es el que requieren para sostener la biomasa en los ecosistemas terrestres, las funciones ecológicas, la biodiversidad, secuestro de carbono y antidesertificación (Falkenmark y Rockstrom, 2005); por lo cual es importante considerar a

los ecosistemas como un consumidor más de agua, en el mismo nivel de la industria, el sector doméstico y el agropecuario; evaluar la prioridad de asignación de recursos e integrarlos en los planes de manejo de recurso hídrico. Para ello, se debe avanzar en el conocimiento de cuánta agua necesitan para cumplir con sus funciones ecosistémicas.

La cuenca no tiene problemas de disponibilidad de agua en su oferta; sin embargo, una opción para cambiar los patrones de consumo es que se haga más visible el carácter local del contenido de agua virtual (huella hídrica en m<sup>3</sup>/ton) de un determinado producto, en el caso agrícola o pecuario, a través de la cadena de suministro, de manera que se pueda comprender mejor las consecuencias e impactos del consumo, en una determinada región, sobre los recursos hídricos locales de otra (Sotelo, 2011).

Mientras que el consumo de agua va en aumento, debido al incremento de la población y producción de alimentos para satisfacer dicha creciente demanda, los ecosistemas deben ser mejor protegidos de posibles disminuciones de caudal. Por tal razón, es necesario definir una metodología clara de cálculo de caudal ecológico y/o ambiental, y la normatividad asociada al mismo que permita respetarlo.

Un paso fundamental para un adecuado manejo de recursos hídricos es la distinción que debe hacerse entre el agua verde y azul. Esta distinción permite realizar una contabilidad del agua más adecuada y observar cómo se distribuye el recurso entre los diferentes usos; por ejemplo, consumos de agua azul por parte de las actividades económicas presentes; y el agua requerida para los ecosistemas naturales, terrestres y acuáticos.

A largo plazo, el agua verde será aún más importante para un desarrollo socioeconómico organizado, que el agua azul que ahora atrae toda la atención de los planificadores y los responsables políticos. Por lo anterior, es estrictamente necesario introducir una dimensión de agua verde e incorporar el uso del suelo, en las políticas referentes a la gestión integrada del recurso hídrico (GIRH). La estrecha relación entre el uso del suelo y el agua tiene que ser ampliamente conocida y traducida las políticas de gestión; a su vez requiere de una integración entre la planificación y manejo del uso del suelo y el manejo integrado de recursos hídricos, llamado comúnmente por algunos autores “manejo integrado del uso del suelo y agua” (Berry *et al.*, 2006; Falkenmark y Rockstrom, 2004).

## 7. Conclusiones

El estudio muestra que la huella hídrica agrícola total es de aproximadamente 250 Mm<sup>3</sup>/año, para los años 2005-2010 (93% verde, 5% azul y 2% gris). La gran proporción de la HH verde, en relación con las demás, confirma la importancia del agua verde en la producción de alimentos de la cuenca. La fracción de agua azul es menor (12%), debido a que las condiciones de cultivo son, en su mayoría, de secano y solo algunos cultivos usan riego. La participación de la huella hídrica gris es relativamente pequeña (2%), pero esta es una estimación conservadora, solo se analizó el volumen necesario para la asimilación de nitrógeno lixiviado de los fertilizantes, dejando por fuera otros contaminantes importantes en la actividad agrícola, como el fósforo y los pesticidas.

La huella hídrica de la actividad ganadera es 2 veces más grande que la de la agricultura, esto se debe a la HH verde de los pastos utilizados en la alimentación del ganado, principalmente bovino, que en última instancia corresponde a un cultivo.

Los resultados de este estudio revelaron que existe un desequilibrio entre el agua disponible en una región geográfica explícitamente delimitada, en este caso la cuenca del río Porce, los usos de la tierra y sus recursos naturales. Sin embargo, también se reconoce que varios obstáculos cuestionan su aplicación, algunos de los cuales se encuentran a escala regional y local. No obstante, la huella hídrica se plantea como una herramienta que brinda información adicional al diseño y posterior construcción de políticas y lineamientos de manejo del recurso hídrico, al permitir una comparación entre los usos existentes y los recursos disponibles, así como el proporcionar conocimientos útiles en cuanto a si una región está usando sus recursos de manera efectiva.

En general, se puede asegurar que hay agua azul suficiente en la cuenca del río Porce para atender las necesidades (huella hídrica azul) de la actividad agrícola y pecuaria actual y futura, aunque el rápido crecimiento poblacional de la región y la demanda por nuevos

recursos, revelan la necesidad de cambio de hábitos de consumo y de una producción sostenible.

Este es un primer acercamiento al estudio de la huella hídrica de la agricultura y la ganadería a escala de cuenca en el país, tomando como piloto la cuenca del río Porce. Además de reducir las incertidumbres y mejorar los cálculos en la medida de lo posible, sería conveniente centrarse en las cuencas identificadas como *hotspot*, en el presente estudio, o en cultivos para realizar análisis más específicos, poniéndolos en relación con datos económicos y sociales.

## Bibliografía

- Aldaya, M. M., Hoekstra, A. Y., & Allan, J. A. (2008). Strategic importance of green water in international crop trade (p. 36). Delft, The Netherlands.
- Aldaya, M. M., Martínez-Santos, P., & Llamas, M. R. (2009). Incorporating the Water Footprint and Virtual Water into Policy: Reflections from the Mancha Occidental Region, Spain. *Water Resources Management*, 24(5), 941–958.
- Allan, J.A., 1998. Virtual water: a strategic resource, global solutions to regional deficits. *Groundwater* 36 (4), 545–546.
- Arevalo D., Lozano J., & Sabogal. J. (2011). Estudio nacional de huella hídrica Colombia, sector agrícola. *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*. 7:101-127
- Boulay, A.M; Bulle, C; Deschênes, L., & Margni, M. 2011. LCA Characterization of freshwater use on human health and through compensation. *Towards Life Cycle Sustainability Management*. Springer. Berlin. 635p.
- Buchanan M. 2003. *Horse Manure Management, A Guide for Bay Area Horse Keepers*. Buchanan Associates, Scotts Valley, CA. 38p.
- Bulsink, F, Hoekstra A.Y., & Booij. M. J. 2009. The Water Footprint of Indonesian provinces related to the consumption of crops products. *Value of Water Research Report Series No. 37*, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
- Casado, R. R., Garrido, A., & Llamas, M. R. 2004. La huella hidrológica de la agricultura española (p. 22). Madrid, España.
- Cely G. E. 2010. Determinación de parámetros de riego para el cultivo de cebolla de bulbo en el distrito de riego del Alto Chicamocha. *Maestría en Ciencias Agrarias, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Medellín*.
- Chapagain, A K, & Orr, S. (2009). An improved water footprint methodology linking global consumption to local water resources: a case of Spanish tomatoes. *Journal of environmental management*, 90(2), 1219–28.

- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. 2004. Water footprints of nations Value of Water Research Report Series No. 16, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
- Chapagain, A.K. & Hoekstra, A.Y. 2003. Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products, Value of Water Research Report Series No. 13, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
- Chapagain, A.K., & Hoekstra, A. Y. 2011. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics*, 70(4), 749–758.
- Chapagain, A.K., & Hoekstra, A.Y. 2007. The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands. *Ecological Economics* 64 (1), 109–118.
- Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y., Savenije, H.H.G., Gautam, R. 2006. The water footprint of cotton consumption: an assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological Economics* 60 (1), 186–203.
- CORMAGDALENA. Plan de Manejo de la Cuenca del Río Magdalena -Cauca. Segunda fase. Informe final. 2007.
- De Fraiture, C., Cai, X., Amarasinghe, U., Rosegrant, M., & Molden, D., 2004. Does international cereal trade save water? The impact of virtual water trade on global water use, Comprehensive Assessment Research Report 4, IWMI, Colombo.
- De Fraiture, C., Wichelns, D., Rockström, J., Kemp-Benedict, E., Eriyagama, N., Gordon, L.J., Hanjra, M.A., Hoogeveen, J., Huber-Lee, A. & Karlberg, L. 2007. Looking ahead to 2050: scenarios of alternative investment approaches, In: Molden, D. (ed.) *Water for food, water for life: a comprehensive assessment of water management in agriculture*, International Water Management Institute, Colombo, Earthscan, London: pp. 91–145.
- Dudgeon, D., Arthington, A. H., Gessner, M. O., Kawabata, Z. I., Knowler, D. J., L´evêque, C., Naiman, R. J., Prieur-Richard, A.H., Soto, D., & Stiassny, M. L. J.: Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges, *Biol. Rev.*, 81, 163–182, 2006.
- Dunn, S. M., & Mackay, R. (1995). Spatial variation in evapotranspiration and the influence of land use on catchment hydrology. *Journal of Hydrology*, 171(1-2), 49–73. Ercin, A. E., Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). The water footprint of France (p. 64). Delft, The Netherlands.

- Ercin, A. E; Aldaya, M. & Hoekstra, A.Y. 2011. The water footprint of soy milk and soy burger and equivalent animal products. Value of Water: Research Report Series N. 49. UNESCO – IHE. Paris, France. 2011.
- Falconer, R. A., Norton, M. R., Fernando, H. J. S., Klaiæ, Z., & McCulley, J. L. 2012. Global Water Security: Engineering the Future National Security and Human Health Implications of Climate Change, in, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, Springer Netherlands, 261–269.
- Falkenmark, M. 2003. Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges, *Philos.T. R. Soc. Lon. B*, 358, 2037–2049, 2003.
- Falkenmark, M., Rockström, J. 2005. Rain: The Neglected Resource. Swedish Water House Policy Brief Nr. 2. SIWI.
- Falkenmark, M., & Rockstrom, J. 2006. The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management, *J. Water Res. Pl.-ASCE*, 132, 129–132,
- FAO. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma.
- FAO. 2010: CROPWAT 8.0 Model, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, available at: <http://www.fao.org/nr/water/infores/databases/cropwat.html> (last access: 1 June 2012).
- Galloway, J., Burke, M., Bradford, G. E., Naylor, R., Falcon, W., Chapagain, A.K., Gaskell, J.C., McCullough, E., Mooney, H.A., Oleson, K.L.L., Steinfeld, H., Wassenaar, T. & Smil, V. (2007) International trade in meat: The tip of the pork chop, *Ambio* 36: 622–629.
- Ge, L., Xie, G., Zhang, C., Li, S., Qi, Y., Cao, S., & He, T. 2011. An Evaluation of China's Water Footprint. *Water Resources Management*, 25(10), 2633–2647.
- Gerbens-Leenes, P.W., Hoekstra, A.Y., 2008. Business water footprint accounting: a tool to assess how production of goods and services impacts on freshwater resources worldwide, Value of Water Research Report Series No.27, UNESCO-IHE, Delft.
- Gerbens-Leenes, P.W., Hoekstra, A.Y., & Van der Meer, Th .H., 2008. Water footprint of bio-energy and other primary energy carriers, Value of Water Research Report Series No.29, UNESCO-IHE, Delft.
- Hoekstra, A Y, Booij M.J. & Hunink J.C., M. K. S. 2012. Blue water footprint of agriculture, industry, house holds and water magemente in the Netherlands. (UNESCO-IHE, Ed.) (p. 48). Delft.

- Hoekstra, A. Y. 2008. Water neutral: Reducing and offsetting the impacts of water footprints Value of Water Research Report Series No.28, UNESCO-IHE, Delft
- Hoekstra, A. Y. 2003. Virtual water trade. Value of Water Research Report Series No.12, UNESCO-IHE, Delft
- 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. 2012. The hidden water resource use behind meat and dairy. *Animal Frontiers*, 2(2), 3–8.
- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. 2012. The water footprint of humanity, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 109, 3232–3237,.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual*. (Earthscan, Ed.) (p. 228). London.
- Hoekstra, A. Y., Mekonnen, M. M., Chapagain, A. K., Mathews, R. E., & Richter, B. D. 2012. Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability. *PloS one*, 7(2), 1–9.
- Hoekstra, A. Y. and 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.
- Hoekstra, A. Y. and Chapagain, A. K. 2008. *Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources*, Blackwell Publishing, Oxford, UK.
- Hoekstra, A. Y. y Hung, P. Q. 2002. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Value of Water Research Report Series No. 11, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands.
- Horlemann, L. & Neubert, S. 2007. *Virtual Water Trade: A Realistic Concept for Resolving the Water Crisis?* Studies 25. German Development Institute, Bonn.
- Hummel, D., Kluge, T., Liehr, S., Hachelaf, M., 2007. *Virtual Water Trade: Documentation of an international expert workshop*, July 2006, Institute for Social–Ecological Research, Frankfurt.
- IDEAM. (2010). *Estudio nacional del agua* (p. 253). Bogotá, Colombia.
- IGAC. 2007. *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Antioquia*. Bogotá. 992 p.

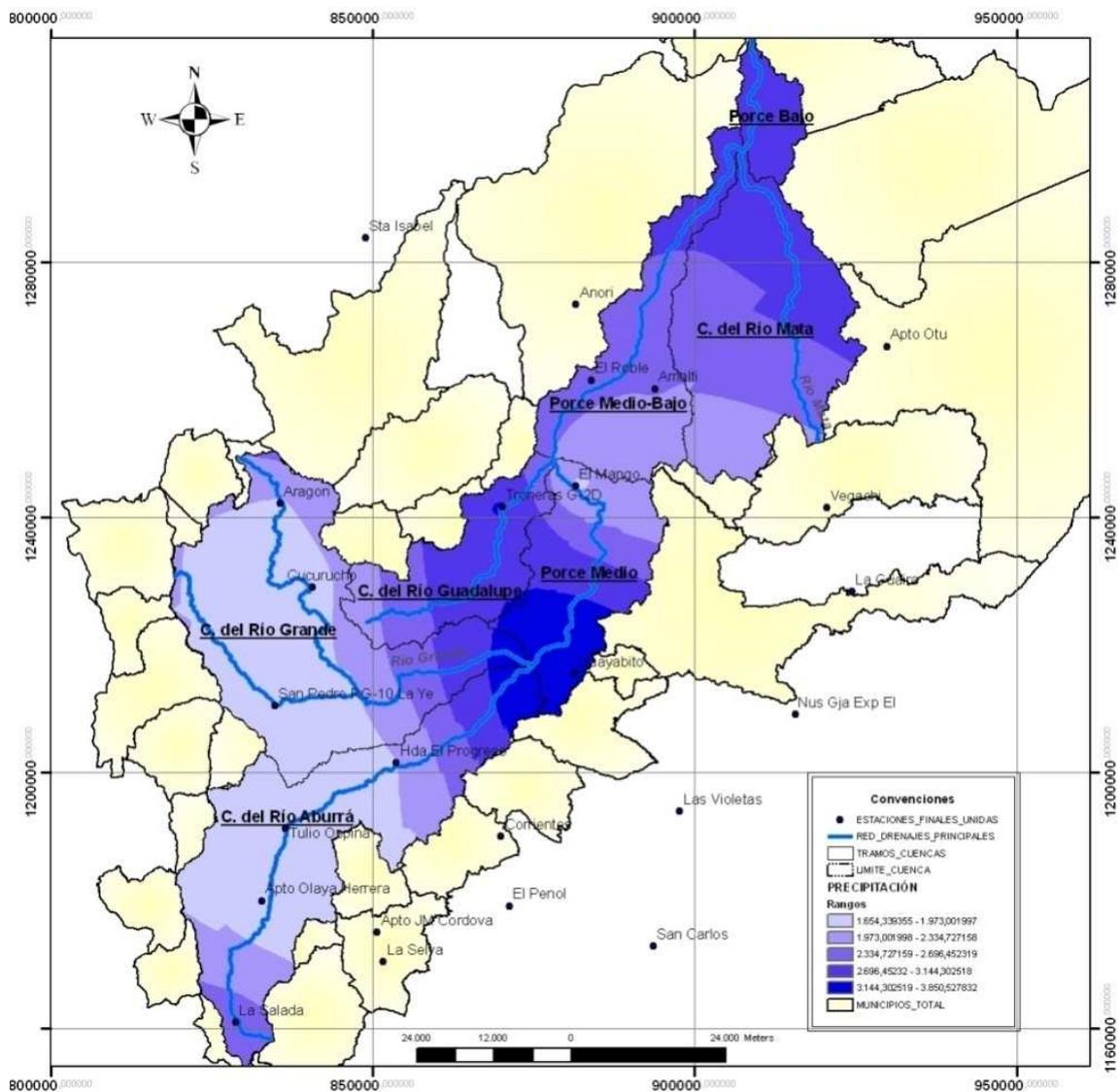
- Iglesias, L. 1994. El estiércol y las prácticas agrarias respetuosas con el medio ambiente. Hojas divulgadoras. No. 1. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. España.
- Jeswani, H. K., & Azapagic, A. 2011. Water footprint: methodologies and a case study for assessing the impacts of water use. *Journal of Cleaner Production*, 19(12), 1288–1299.
- Kampman, D.A., Hoekstra, A.Y. & Krol, M.S. 2008. The Water Footprint of India, Value of Water Research Report Series No.32, UNESCO-IHE, Delft.
- Kongboon, R., & Sampattagul, S. 2012. The water footprint of sugarcane and cassava in northern Thailand. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 40, 451–460.
- L'vovich, M.I., White, G.F. & Turner, B.L.I. 1990. Use and transformation of terrestrial water systems, in Turner II, B.L. *et al.* (ed.), *The earth as transformed by human action: Global and regional changes in the biosphere over the past 300 years*, Cambridge University Press, New York, pp. 235–252.
- León, J., Mojica, J., Castro, E., Cárdenas, E., Pabón, M. & Carulla, J. 2008. Balance de nitrógeno y fósforo de vacas lecheras en pastoreo con diferentes ofertas de kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) suplementadas con ensilaje de avena (*Avena sativa*). *Revista Colombiana de ciencias pecuarias*. V. 21. P: 559-570.
- Liu J. & Yang H. 2010. Spatially explicit assessment of global consumptive water uses in cropland: green and blue water, *Journal of Hydrology* 384: 187-197.
- Liu, J. & Savenije, H. H. G.:2008. Food consumption patterns and their effect on water requirement in China, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12, 887–898.
- Liu, J., Zehnder, A.J.B. & Yang, H. 2009. Global consumptive water use for crop production: The importance of green water and virtual water, *Water Resources Research* 45, W05428.
- Ma, J., Hoekstra, A.Y., Wang, H., Chapagain, A.K. & Wang, D., 2006. Virtual versus real water transfers within China. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 361 (1469), 835–842.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. 2010a. The green , Blue and Grey Water Footprint of Crops and Derived Crops Products Value of Water Research Report Series No.47, UNESCO-IHE, Delft.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. 2010b. The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products. Value of Water Research Report Series No.48, UNESCO-IHE, Delft.
- Montoya, J. J. (2008). Desarrollo de un modelo conceptual de producción, transporte y depósito de sedimentos. Valencia.

- Oel, P. R. V., & Hoekstra, A. Y. 2010. The green and blue water footprint of paper products: Value of Water Research Report Series No.46, UNESCO-IHE, Delft.
- Oel, P. R., & Hoekstra, A. Y. 2011. Towards Quantification of the Water Footprint of Paper: A First Estimate of its Consumptive Component. *Water Resources Management*, 26(3), 733–749.
- Oki, T. & Kanae, S. 2004. Global hydrological cycles and world water resources, *Science*, 313, 1068-1072.
- Peden, D., Tadesse, G., Misra, A.K., Ahmed, F.A., Astatke, A., Ayalneh, W., Herrero, M., Kiwuwa, G., Kumsa, T., Mati, B., Mpairwe, D., Wassenaar, T. & Yimegnuhal, A. 2007. Water and livestock for human development, In: Molden, D. (ed.) *Water for food, water for life: a comprehensive assessment of water management in agriculture*, International Water Management Institute, Colombo, Earthscan, London: pp. 485–514.
- Pimentel, D., Berger, B., Filiberto, D., Newton, M., Wolfe, B., Karabinakis, E., Clark, S., Poon, E., Abbett, E. & Nandagopal, S. 2004. Water resources: agricultural and environmental issues, *BioScience* 54(10): 909-918.
- Postel, S.L., Daily, G.C. and Ehrlich, P.R. 1996. Human appropriation of renewable freshwater, *Science* 271 (5250): 785–788.
- REDRIO. 2011. Red de monitoreo ambiental en la cuenca del río Aburrá en jurisdicción del Área Metropolitana – Fase III. RedRioAburrá-Medellín - Área Metropolitana. Medellín.
- Renault, D. & Wallender, W.W. 2000. Nutritional water productivity and diets, *Agricultural Water Management* 45: 275-296.
- Ridoutt, B. G., Williams, S. R. O., Baud, S., Fraval, S., & Marks, N. 2010. Short communication: The water footprint of dairy products: case study involving skim milk powder. *Journal of dairy science*, 93(11), 5114–7.
- Rockstrom, J. & Gordon, L. (2001) Assessment of green water flows to sustain major biomes of the world: Implications for future ecohydrological landscape management, *Physics and Chemistry of the Earth* 26(11-12): 843-851.
- Rockström, J., Gordon, L., Falkenmark, M., Folke, C. & Engvall, M. (1999) Linkages among water vapor flows, food production, and terrestrial ecosystem services, *Conservation Ecology* 3(2): 5.

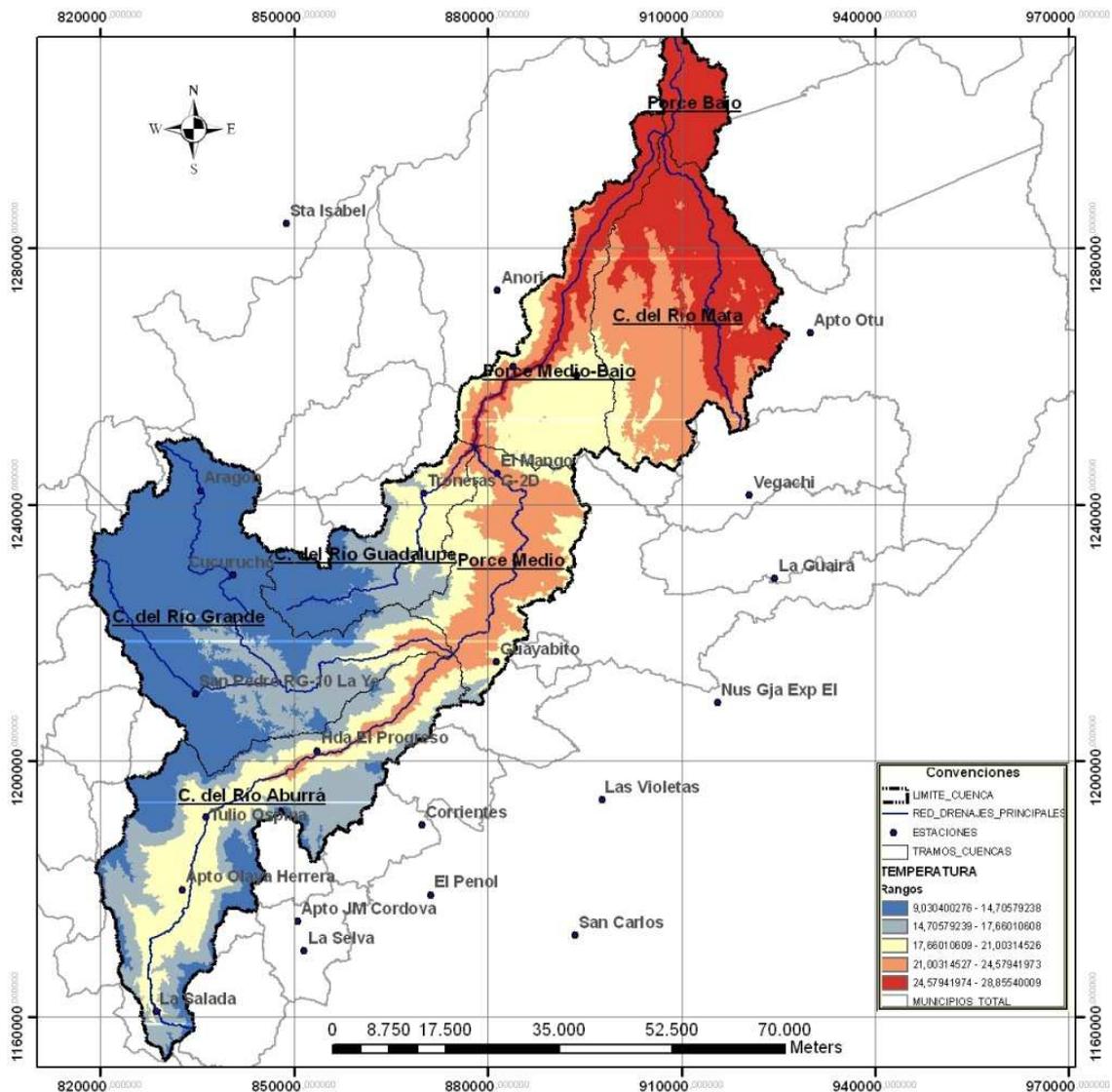
- Romaguera, M., Hoekstra, A. Y., Su, Z., Krol, M. S., & Salama, M. S. (2010). Potential of Using remote Sensing Techniques for Global Assessment of Water Footprint of Crops. *Remote Sensing*, 2(4), 1177–1196.
- Rosegrant, M. W. and Ringler, C. (2000) Impact on food security and rural development of transferring water out of agriculture, *Water Policy* 1(6): 567-586.
- Rost, S., Gerten, D., Bondeau, A., Lucht, W., Rohwer, J. & Schaphoff, S. (2008) Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system, *Water Resources Research* 44: W09405 doi:10.1029/2007WR006331.
- Roth, D., & Warner, J. (2007). Virtual water: Virtuous impact? The unsteady state of virtual water. *Agriculture and Human Values*, 25(2), 257–270.
- Samoral G., Dumont, A., & Aldaya. (2011). Análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir (p. 47). Madrid, España.
- Seckler, D., Amarasinghe, U. & Molden, D.J., de Silva, R. and Barker, R. (1998) World water demand and supply, 1990–2025: Scenarios and issues, IWMI Research Report 19, IWMI, Colombo, Sri Lanka.
- Shiklomanov, I.A. (1993) World fresh water resources, In: Gleick, P.H. (ed.) *Water in crisis: A guide to the world's fresh water resources*, Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 13-24
- Shiklomanov, I.A. and Rodda, J.C. (eds.) (2003) *World water resources at the beginning of the twenty-first century*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Siebert, S. and Döll, P. (2008) The global crop water model (GCWM): Documentation and first results for irrigated crops. Frankfurt Hydrology Paper 07, Institute of Physical Geography, University of Frankfurt, Frankfurt am Main, Germany.
- Siebert, S. and Döll, P. (2010) Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation, *Journal of Hydrology* 384: 198-207.
- Van Breugel, P., Herrero, M., Van De Steeg, J. and Peden, D. (2010) Livestock water use and productivity in the Nile Basin, *Ecosystems* 13(2): 205-221.
- van Oel, P. R., Mekonnen, M. M., & Hoekstra, a. Y. (2009). The external water footprint of the Netherlands: Geographically-explicit quantification and impact assessment. *Ecological Economics*, 69(1), 82–92. doi:10.1016/j.ecolecon.2009.07.014
- Velásquez, N. 2011. Simulación de sedimentos a partir de un modelo conceptual y distribuido no lineal. Tesis MSc. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 131 p.

- WWC, 2004. E-conferencesynthesis: Virtual watertradeconsciouschoices, WWC Publication No.2, WorldWater Council, Marseille.
- WWF. (2012). Una mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica (p. 48). Bogota, Colombia.
- Yu, Y., Hubacek, K., Feng, K., &Guan, D. (2010). Assessing regional and global water footprints for the UK. *Ecological Economics*, 69(5), 1140–1147. doi:10.1016/j.ecolecon.2009.12.008
- Zeng, Z., Liu, J., Koeneman, P. H., Zarate, E., & Hoekstra, a. Y. (2012).Assessing water footprint at river basin level: a case study for the Heihe River Basin in northwest China.*Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8), 2771–2781.
- Zimmer D. y Renault D. (2003). Virtual water in food production and global trade: review of methodological issues and preliminary results (pp. 1–19). Delft, TheNetherlands.

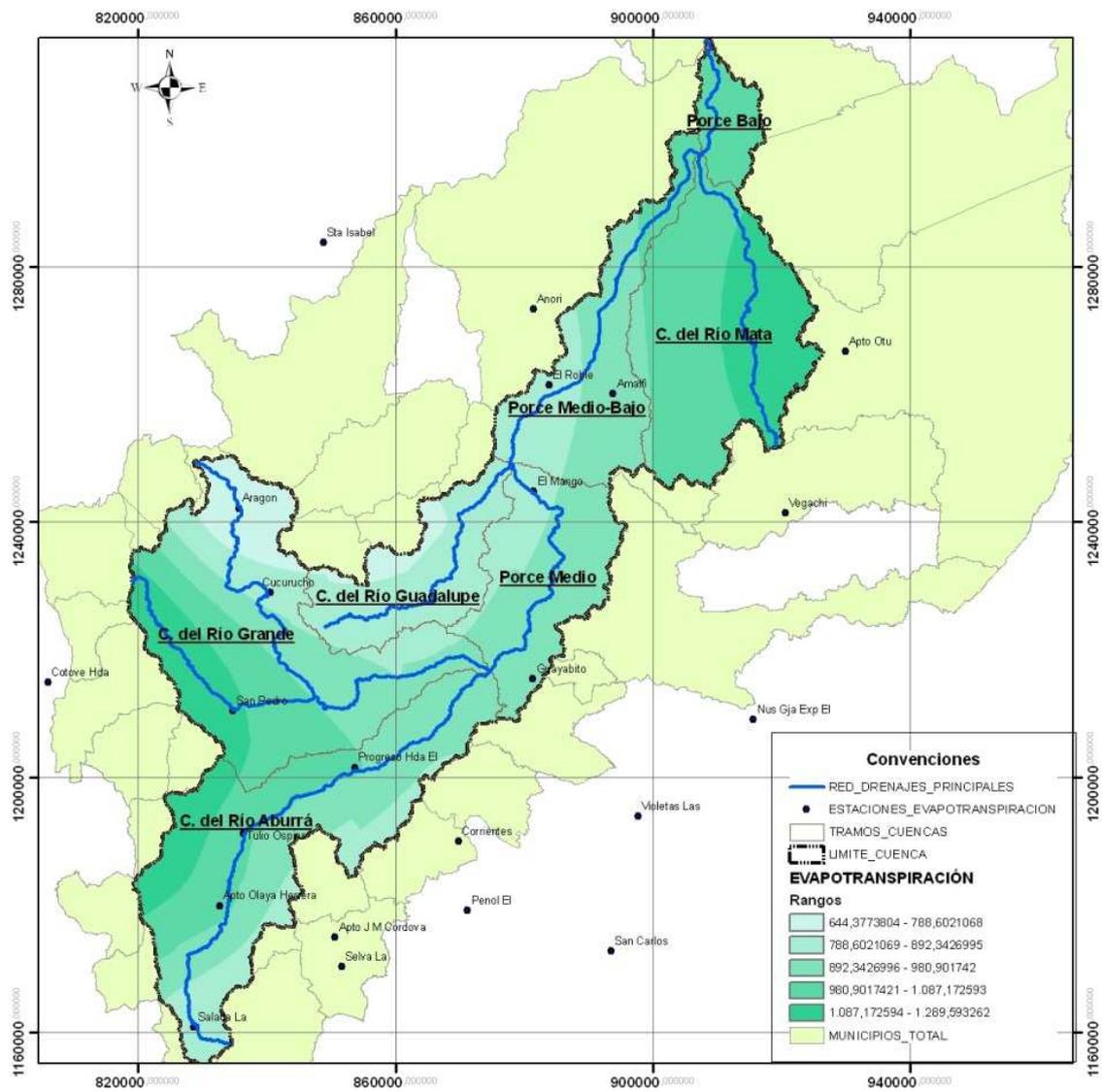
## A. Anexo: Mapa de precipitación media anual (mm/año) para la cuenca del río Porce



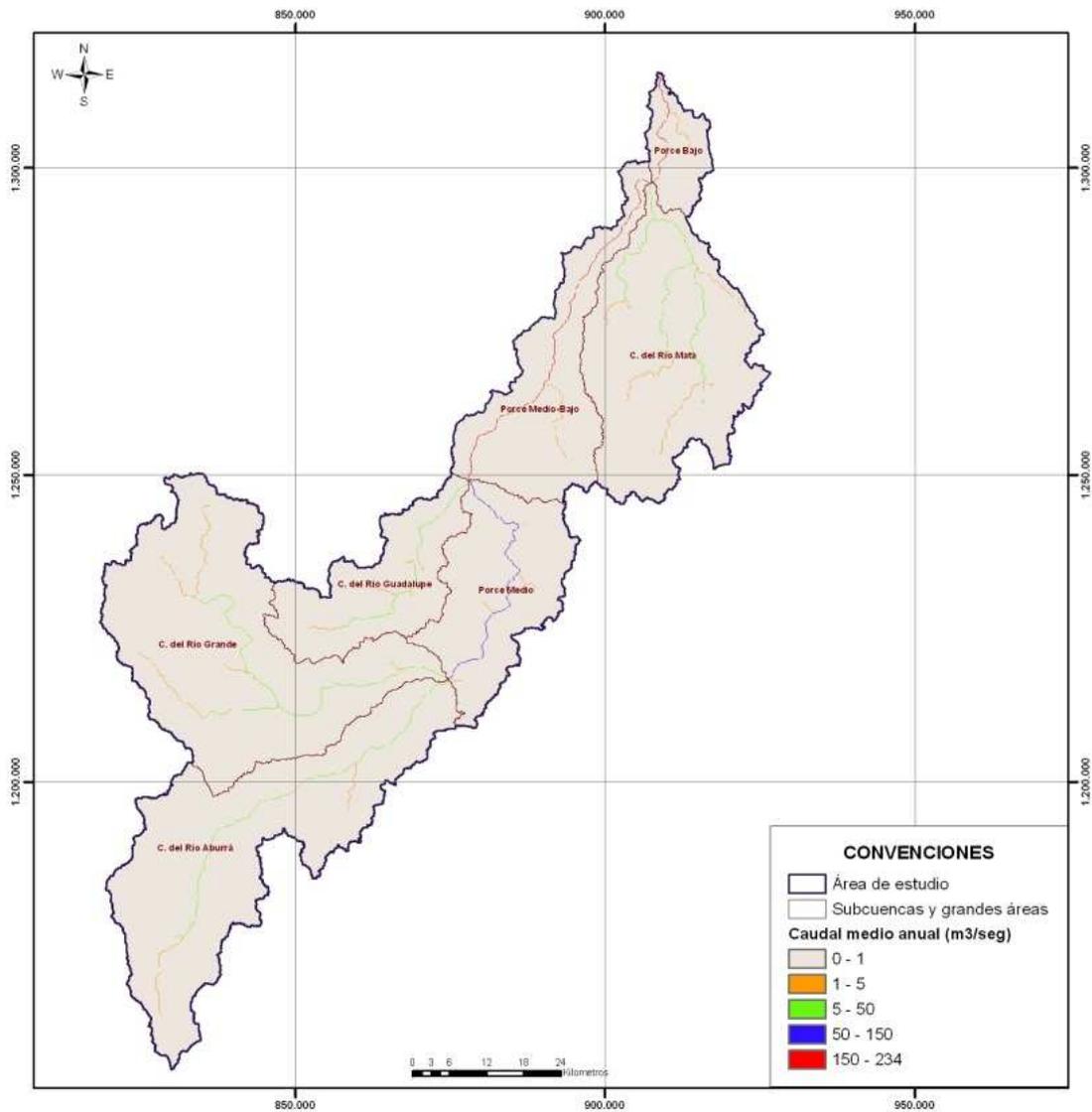
## B. Anexo: Mapa de temperatura media de la cuenca del río Porce



# C. Anexo: Mapa de evapotranspiración media de la cuenca del río Porce



## D. Anexo: Mapa de caudales medios de la cuenca del río Porce



Caudales máximos y mínimos de la cuenca del río Porce a diferentes periodos de retorno

Periodos de retorno (años)	Q mínimos (m <sup>3</sup> /s)	Q máximos (m <sup>3</sup> /s)
2,3	141	502
10	201	740
50	259	971
100	283	1069

## E. Anexo: Tabla semáforo sostenibilidad ambiental

Tramos		ANÁLISIS AMBIENTAL			
		S. H. H. AZUL	HHG	DISP. AGUA VERDE S. AP	
		Oferta	LCA	Actual	Z. Ambiental
C. del Río Aburrá	C. de la Q. Doña María				
	C. de la Q. La García				
	C. de la Q. La Iguaná				
	C. de la Q. Ovejas				
	C. de la Q. Piedras Blancas				
	C. de la Q. Santa Elena				
	Río Medellín				
	<b>Total tramo</b>				
C. del Río Grande	C. de la Q. Don Diego				
	C. de la Q. El Hato				
	C. de la Q. Higuaron				
	C. de la Q. La Torura				
	C. de la Q. Quebradona				
	C. del Río Chico				
	Río Grande - AE				
	Río Grande - DE				
	<b>Total tramo</b>				
C. del Río Guadalupe	C. de la Q. El Vergel				
	C. de la Q. Guanacas				
	Río Guadalupe - AE				
	Río Guadalupe - DE				
	<b>Total tramo</b>				
C. Porce Medio	C. de la Q. La Cancana				
	C. de la Q. Quebradona				
	C. de la Q. Santiago				
	C. Porce Medio - AE				
	C. Porce Medio - DE				

		Total tramo		
<b>C. Porce Medio Bajo</b>	C. del Río Riachón			
	Río Porce MB - AE			
	Río Porce MB - DE			
	<b>Total tramo</b>			
<b>C. del Río Mata</b>	C. de la Q. Quebradona			
	C. del Río Maní			
	C. del Río Mata			
	C. del Río Monos			
	C. del Río Poceró			
	C. del Río Tinita			
	<b>Total tramo</b>			
<b>C. Porce Bajo</b>	C. del Río Cana			
	C. Porce Bajo			

## F. Anexo: Caudales simulados en cada subcuenca (m<sup>3</sup>/mes)

SUBCUENCA	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Cana	13,075,480	10,621,200	11,193,273	15,678,051	19,457,981	21,667,780	20,926,906	21,781,168	21,157,246	23,027,755	22,342,212	17,037,562
Porce Bajo	518,007,168	390,594,834	453,693,726	626,145,750	932,791,070	1,034,139,255	959,036,938	925,470,852	997,327,583	1,061,155,059	1,040,111,021	775,016,931
Mata	135,860,761	105,688,005	111,526,348	140,297,914	186,716,982	218,695,874	213,272,277	219,903,804	225,345,771	244,026,331	237,102,395	187,822,605
Tinita	30,263,764	23,593,072	23,213,413	26,898,722	34,881,797	41,416,472	40,872,327	43,322,854	43,301,719	47,529,135	46,489,934	39,547,155
Pocoro	33,591,077	26,113,588	26,836,170	31,983,439	41,818,401	48,992,496	48,483,021	49,644,977	51,243,103	55,258,217	54,363,629	44,728,998
Mani	12,602,345	9,620,753	9,777,021	12,181,699	16,168,360	19,112,186	18,875,359	19,522,645	19,613,873	21,326,022	20,947,431	17,101,450
Monos	12,973,584	9,121,661	10,335,411	14,141,812	20,051,013	24,392,843	23,617,468	23,233,094	24,713,904	26,496,659	26,020,782	19,821,368
Q Quebradona (T)	8,369,465	6,534,600	6,558,051	7,676,743	9,981,839	11,723,837	11,605,074	12,185,934	12,318,586	13,447,862	13,119,460	11,058,734
Riachón	17,549,679	14,562,114	15,851,097	18,088,578	23,022,068	25,778,267	25,365,779	24,704,220	27,335,432	27,765,925	27,740,894	22,171,074
Q La Cancana	5,106,829	3,467,272	4,266,185	6,502,712	10,318,830	12,223,627	11,724,667	11,094,716	12,445,541	12,454,463	11,846,200	8,384,601
Guadalupe	41,715,459	27,641,210	31,551,623	48,163,555	86,378,310	106,173,020	100,774,998	93,950,595	98,301,009	96,854,435	91,475,222	68,717,932
Q Quebradona (RG)	11,853,276	8,332,699	11,216,570	15,659,292	24,534,534	27,054,404	23,466,560	21,550,913	23,173,966	24,493,986	26,784,741	19,605,324
Riogrande	86,256,816	60,950,045	79,279,840	114,735,026	184,419,842	204,413,055	182,515,235	168,084,608	181,595,602	189,888,011	198,324,323	142,022,405
Q Santiago	4,737,818	3,168,952	3,753,148	5,319,125	9,547,286	11,031,106	10,672,087	9,823,945	10,166,319	10,532,386	9,769,986	7,512,205

SUBCUENCA	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Q Ovejas	6,114,043	4,146,575	5,210,980	8,020,457	13,007,499	14,195,011	12,414,620	11,114,358	12,411,567	14,284,127	14,353,348	9,964,988
Q Piedras Blancas	1,605,842	1,309,676	2,025,610	3,721,151	5,610,252	5,102,181	3,727,779	3,301,209	4,441,849	5,471,410	5,612,154	3,028,945
Q La García	5,763,991	5,144,770	5,907,385	8,400,495	11,574,736	10,672,031	8,758,557	8,074,913	10,000,511	11,338,182	11,338,923	7,753,902
Q La Iguaná	2,813,265	2,780,956	4,073,780	6,800,798	9,874,054	8,084,743	6,210,211	5,485,117	7,693,911	9,033,781	8,924,962	4,992,538
Q Santa Elena	2,035,540	1,946,660	3,324,664	5,618,316	8,005,532	6,450,820	4,719,698	4,225,574	6,122,245	7,494,773	7,212,585	3,903,158
Q Doña Maria	4,535,541	4,550,000	6,843,380	11,032,769	15,230,942	11,695,531	9,347,299	8,256,762	11,658,456	14,128,057	13,220,721	7,903,635
Q El Hato	1,997,299	2,017,453	3,576,447	6,198,862	9,448,066	8,304,088	6,073,105	5,384,276	7,330,412	8,044,095	8,293,886	4,154,981
Q Don Diego	1,942,414	1,672,081	2,762,504	4,803,385	7,608,510	7,259,791	5,662,569	5,091,052	6,476,890	7,137,318	7,055,604	3,765,923
Chico	15,098,349	13,540,991	21,952,552	33,301,864	50,133,869	46,650,823	35,871,809	32,360,214	40,299,087	43,280,895	46,689,516	27,907,298
Q La Torura	5,353,943	3,829,720	5,066,608	7,274,435	11,415,267	12,492,934	10,960,886	9,984,162	10,813,313	11,225,934	12,345,052	8,899,967
Q Hígueron	1,081,005	853,310	1,356,396	1,912,008	2,947,345	2,950,473	2,360,114	2,169,283	2,509,567	2,649,161	3,025,771	2,009,842
Q Quebradona (PM)	4,789,959	3,070,293	3,706,946	5,761,253	9,843,439	11,642,409	11,144,515	10,473,876	11,268,256	11,506,063	10,798,408	7,978,275
Q El Vergel	2,859,395	1,837,404	2,093,757	3,071,621	5,424,529	6,933,336	6,750,398	6,389,444	6,493,829	6,276,055	6,240,713	4,701,986
Q Guanacas	5,814,641	3,935,578	4,654,064	7,288,854	13,237,328	16,057,290	14,953,459	13,884,540	14,525,800	14,139,209	13,441,379	9,808,599
Medellín	80,971,182	67,252,807	92,538,186	141,001,109	206,964,165	189,224,127	159,647,625	145,642,358	179,349,331	207,227,967	198,738,654	130,699,708
Porce Medio	224,201,430	166,195,829	216,793,207	324,069,730	510,357,123	533,447,170	474,800,521	437,025,218	493,548,076	530,339,581	522,487,650	365,685,646
Porce Medio Bajo	355,541,131	264,132,937	320,183,432	453,850,628	705,008,829	769,044,804	701,355,387	659,478,179	727,007,978	768,621,724	754,978,421	551,325,932