

DOI: 10.24850/j-tyca-2020-01-05

Artículo

## **Análisis de la sostenibilidad mediante huella hídrica de la microcuenca del río Pita, Ecuador**

## **Analysis of the sustainability through water footprint in the Pita River microbasin, Ecuador**

Henry Daniel Lala-Ayo<sup>1</sup>

Mirian del Carmen Fernández-Quintana<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Sangolquí, Ecuador,  
hen.dan13@hotmail.com

<sup>2</sup> Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Sangolquí, Ecuador,  
mcfernandezq@hotmail.com

Autor para correspondencia: Henry Lala, hen.dan13@hotmail.com

### **Resumen**

La microcuenca hidrográfica, al ser considerada un espacio económico-social, puede ser el punto de partida para promover iniciativas de desarrollo territorial e inversión desde un enfoque participativo e

incluyente. El propósito del presente trabajo es realizar un análisis referencial del uso de agua en la microcuenca del río Pita, Ecuador, al determinar la huella hídrica, considerando el manejo sostenible y disponibilidad del agua. Para lo cual se calculó la huella azul, verde y gris, partiendo de la metodología referencial propuesta por Arjen Hoekstra y difundida en el manual *Water Footprint Network* desde un enfoque sistémico. Se obtuvo entonces, en promedio, 20.4 millones de m<sup>3</sup> de huella azul, 36.1 millones de m<sup>3</sup> de huella verde y 45.8 millones de m<sup>3</sup> de huella gris, siendo los mayores aportantes en forma general los sectores doméstico, pecuario y agrícola. La oferta natural regulada de agua azul es de 188 millones de m<sup>3</sup> y de agua verde de 64. 19 millones de m<sup>3</sup>, del que se estima que ya no está disponible en el medio el 11% y 56% respectivamente. Con base en los indicadores planteados, la microcuenca del río Pita muestra sostenibilidad a la fecha para consumo, disponibilidad y capacidad de depuración de agua, con índices de escasez menores que uno en los tres casos. También se establece que los sectores que más recursos monetarios generan son el pecuario y energético, con USD 44 millones anuales cada uno.

**Palabras clave:** huella hídrica, microcuenca hidrográfica, sostenibilidad, sectores económicos.

## Abstract

The micro watershed, being considered an economic-social space, can be the starting point for promoting territorial development and investment

initiatives from a participatory and inclusive approach. The purpose of this work is to carry out a referential analysis of water use in the micro watershed of the Pita River, Ecuador, by determining the water footprint, considering the sustainable management and availability of water. The blue, green and gray footprints has been calculated from the referential methodology proposed by Arjen Hoekstra and disseminated in *the Water Footprint Network* manual, from a systemic approach. An average of 20.4 million m<sup>3</sup> of blue footprint, 36.1 million m<sup>3</sup> of green footprint and 45.8 million m<sup>3</sup> of grey footprint was obtained, with the largest contributors in general being the domestic, livestock and agricultural sectors. The regulated natural supply of blue water is 188 million m<sup>3</sup> and green water is 64.19 million m<sup>3</sup>, of which 11% and 56%, respectively, are estimated to be no longer available in the environment. Based on the proposed indicators, the micro watershed of the Pita River shows sustainability to date; for consumption, availability and purification capacity of water, with scarcity indices less than one in the three cases. It is also established that the sectors that generate more monetary resources are livestock and energy each one with USD 44 million per year.

**Keywords:** Water footprint, hydrographic microbasin, sustainability, economics sectors.

Recibido: 24/04/2018

Aceptado: 02/04/2019

## Introducción

Las interrelaciones entre el agua y la sostenibilidad van mucho más allá de su dimensión social, económica y ambiental, pues constituyen desafíos cruciales para fortalecer o debilitar la gama de servicios que proporcionan a través del desarrollo sostenible (UNESCO, 2015). En tal razón, la Organización de las Naciones Unidas en la Cumbre del Milenio establece el siguiente objetivo: "El agua es fuente de vida, y contempla la elaboración de planes de gestión integrada y aprovechamiento eficiente del recurso hídrico y reducción de la explotación insostenible del agua" (ONU-Agua, 2005).

La huella hídrica se considera una herramienta alternativa para mejorar la gestión tradicional del agua, la cual toma en cuenta las actividades socioeconómicas como el principal factor de presión sobre los recursos naturales, estableciendo una relación directa entre el hombre y el sistema hídrico, y fortaleciendo los vínculos entre los distintos actores sociales y económicos involucrados (Tólon, Lastra, & Fernández, 2013). Semejante enfoque permitirá mayor injerencia, favoreciendo de esta manera procesos de democratización, empoderamiento de la sociedad civil y descentralización para el desarrollo sostenible (FAO, 2007).

En 2004, Chapagain y Hoekstra realizaron la primera estimación de la huella hídrica, *Water Footprints of Nations*, en el que se evidencia que la huella hídrica mundial es de 7 450 km<sup>3</sup>/año y que cada habitante del planeta consume alrededor de 1 240 m<sup>3</sup>/cápita/año (Tolon *et al.*, 2013). Tales estimaciones se consideran el punto de partida para promover iniciativas de organización, desarrollo territorial e inversión desde un enfoque participativo e incluyente, logrando una gestión y aprovechamiento integral del agua.

Un estudio realizado en Madrid en 2011 trata del “Análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir.” En el cual introduce indicadores económicos, siendo la vertiente económica clave a la hora de analizar los consumos de agua. Presenta también por primera vez la integración de la huella hídrica dentro del ciclo hidrológico y su balance a escala de cuenca. “Este trabajo analiza la huella hídrica con el fin de facilitar información para la mejora de la asignación y gestión de los recursos hídricos en la cuenca, se diferencia entre agua verde y azul (agua de origen superficial y subterráneo)” (Salmoral *et al.*, 2011).

Ecuador, por su posición geográfica y características geomorfológicas, posee una serie de afluentes y recursos hídricos, los cuales constituyen la base natural para desarrollo de la población. En particular el río Pita abastece las necesidades de quienes viven y producen en la microcuenca y fuera de ella, así como de poblaciones más lejanas que necesitan el agua para su consumo y son suministradas desde el mismo afluente. Esta agua sirve a gran parte del centro y sur de Quito,

convirtiéndose en el segundo sistema más importante de la capital después del de Papallacta; su aporte cubre alrededor de un 38% de toda el agua potable producida para el Distrito Metropolitano de Quito (MAE, 2012). Por ello es necesario cuantificar y estimar el nivel actual frente al consumo, disponibilidad y capacidad de depuración de agua en que se encuentra la microcuenca, lineamientos que fundamentan la sostenibilidad en este estudio, pudiendo replicar la metodología aplicada a otras microcuencas dentro del país, pues no existen estudios similares en el Ecuador, por lo que se pretende gestionar como una herramienta de alta injerencia en el desarrollo de planes integrales de manejo de cuencas hidrográficas.

## Área de estudio

La microcuenca del río Pita tiene alrededor de 592.4 hectáreas, forma parte del sistema hidrográfico Guayllabamba, ubicada en Ecuador, provincia de Pichincha, en los cantones Quito, Rumiñahui y Mejía (Figura 1). El río Pita nace en la unión de las quebradas Hualpaloma y Carcelén, en los páramos occidentales del Sincholagua (Freile & Fabara, 2009).



**Figura 1.** Mapa de la ubicación de zona de estudio (microcuenca del río Pita).

La proporción parroquial del área de la microcuenca se describe a continuación: Pintag, 55.8%; Machachi, 38.2%; Rumipamba, 3.2%; y Sangolquí, 1.7% (MAE, 2012). En la Tabla 1 se presenta la ubicación de la microcuenca mediante coordenadas geográficas.

**Tabla 1.** Coordenadas geográficas del área de estudio.

<b>Núm.</b>	<b>Punto límite</b>	<b>Coordenadas</b>	
		<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>
1	Punto límite 1	0° 37' 0.048" S	78° 21' 23.227" O
2	Punto límite 2	0° 17' 25.137" S	78° 27' 47.517" O
3	Punto límite 3	0° 34' 91.645" S	78° 34' 24.670" O

4	Punto límite 4	0° 24' 56.720" S	78° 16' 43.461" O
---	----------------	------------------	-------------------

## Materiales y métodos

El análisis de la sostenibilidad de la microcuenca se basa en la metodología planteada en el manual *The Water Footprint Assessment* (Hoekstra *et al.*, 2011, citado en CTA, 2013). La evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica viene dada por la Ecuación (1); se han realizado aportes particulares para el contexto local y los sectores productivos propios de la zona:

$$HH = \sum_i HH \text{ procesos } (i) \quad (1)$$

Donde:

- $HH$  = huella hídrica.
- $i$  = número de procesos.
- $HH$  procesos ( $i$ ) = huella hídrica de  $i$  procesos.

De acuerdo con los sectores económicos de la microcuenca, los componentes de la huella hídrica son agropecuario, doméstico, industrial, energético y minero, los cuales serán analizados temporal y geográficamente. A su vez, la huella hídrica se puede subdividir en:

- Huella hídrica verde. Se refiere al consumo de agua almacenada en el suelo, proveniente de la precipitación que no se convirtió en escorrentía y se incorporó en los productos agrícolas.
- Huella hídrica azul. Se refiere al consumo de agua extraída de una fuente superficial o subterránea, que no vuelve a la cuenca hidrográfica de la cual fue retirada. En el sector agrícola es cuantificada por el agua consumida, y en los otros sectores se considera el volumen del agua evaporada o incorporada en sus cadenas de producción.
- Huella hídrica gris. Se refiere al volumen de agua dulce necesario para asimilar la carga de contaminantes por parte de un cuerpo receptor, tomando como referencia los límites máximos establecidos en una norma. Para el contexto local, se consideró el Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (MAE, 2015) libro VI, anexo 1. La huella hídrica Gris se calculó en función de los contaminantes: nitrógeno y fósforo total en los sectores agrícola y pecuario; sólidos suspendidos totales (SST); demanda química de oxígeno (DQO), y demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) para los sectores minero y doméstico, respectivamente.

## Sector agropecuario

### Subsector agrícola

Los requerimientos de agua se estimaron mediante la modelación de la interrelación de variables climáticas, edáficas y características propias del cultivo, que influyen en el comportamiento esperado por la especie vegetal a través del modelo de simulación *CROPWAT 8.0* de FAO.

- Variables climáticas: son consideradas para el análisis del subsector agrícola: evapotranspiración de referencia-ETo (mm/día). Método Penman-Monteith y radiación solar (MJ/m<sup>2</sup>/día).
- Variables edáficas: agua disponible total (ADT) y tasa máxima de infiltración (a partir de la granulometría del suelo en el módulo *Soil Water Characteristics* del software libre *SPAW Hidrology*); profundidad radicular máxima; agotamiento inicial de la humedad del suelo (0% para cultivos establecidos en meses húmedos y 50% para meses secos).
- Cultivos: en la microcuenca se identificaron 12 cultivos (ver Tabla 2), todos ellos con áreas mayores a una hectárea, que se

clasificaron en cultivos transitorios, anuales, perennes y plantaciones forestales; se recopiló la información sobre fecha de siembra y cosecha; coeficiente del cultivo ( $k_c$ ); fases de crecimiento, profundidad radicular, fracción de agotamiento crítico ( $p$ ); factor de respuesta de la productividad del cultivo ( $k_y$ ), y altura del cultivo, mismos que fueron obtenidos de la guías FAO (2007) a escala global.

**Tabla 2.** Cultivos determinados en la microcuenca.

Cultivo	Área cultivada (ha)	Cultivo	Área cultivada (ha)	Cultivo	Área cultivada (ha)
Avena	22 144	Maíz	367 399	Rosas	27 778
Cebada	54 389	Papa	129 033	Pino	219 619
Haba	38 025	Alfalfa	3 106	Eucalipto	1 010 65
Tomate	7 984	Alverja	27 715	Pasto	9 680 14
Frijol	61 730				

## Huella verde agrícola

La huella verde es representada por la precipitación efectiva. Este valor fue obtenido del módulo “Climate/Eto” del *CROPWAT 8.0*, cuyo resultado se multiplicó por 10, para realizar la conversión de mm a m<sup>3</sup>/ha. A este último valor se le denomina consumo de agua de cultivo (CUW). La huella hídrica verde de un producto agrícola en una hectárea cultivada se obtiene dividiendo CUW entre el rendimiento del mismo producto (Ecuación (2)):

$$HH \text{ cultivo verde} = \frac{CWU \text{ verde}}{Y} \quad (2)$$

Donde:

- $HH$  cultivo verde = huella hídrica verde de un cultivo en m<sup>3</sup>/t.
- $CWU$  verde = agua verde utilizada por el cultivo en m<sup>3</sup>/ha.
- $Y$  = rendimiento de los cultivos en t/ha.

## Huella azul agrícola

La huella azul se obtuvo mediante la diferencia entre el requerimiento de agua del cultivo y la precipitación efectiva (ET azul), misma que se obtiene de la variable “requerimiento actual de riego” del software *CROPWAT 8.0*;

se debe considerar que si esta diferencia es menor o igual a cero no se tiene huella hídrica azul y ésta se determina a través de la Ecuación (3):

$$HH \text{ cultivo azul} = \frac{CWU \text{ azul}}{Y} \quad (3)$$

Donde:

- $HH$  cultivo azul = huella hídrica verde de un cultivo en  $\text{m}^3/\text{t}$ .
- $CWU$  azul = agua verde utilizada por el cultivo en  $\text{m}^3/\text{ha}$ .
- $Y$  = rendimiento de los cultivos en  $\text{t}/\text{ha}$ .

## **Huella gris agrícola**

La huella gris se determinó utilizando como referente la presencia de contaminantes en el agua por la aplicación de fertilizantes que manejan en su composición nitrógeno (N) y fósforo (P). La concentración del contaminante N y P se midió en las aguas del río Pita y las cargas máximas permisibles para descargas en cuerpos de agua se estableció según él (MAE, 2015). La huella gris se calculó mediante la Ecuación (4):

$$HH \text{ gris producto } A = \frac{L}{C_{\max} - C_{\text{nat}}} \quad (4)$$

Donde:

- $HH$  gris producto  $A$  = huella hídrica gris por producto agrícola ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ).
- $L$  = cantidad de fertilizante aplicado ( $\text{kg}/\text{ha}$ ).
- $C_{\max}$  = concentración máxima permisible de N y P en el agua ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).
- $C_{\text{nat}}$  = concentración natural de N y P en el cuerpo receptor ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Es necesario dividir este valor entre el rendimiento del mismo producto para equiparar y comparar con las otras dos huellas (azul y verde) del mismo sector (Ecuación (5)):

$$HH \text{ gris } A = \frac{HH \text{ gris producto } A}{rend_cult} \quad (5)$$

Donde:

- $HH$  gris  $A$  = huella hídrica gris agrícola ( $\text{m}^3/\text{t}$ ).
- $HH$  gris producto  $A$  = huella hídrica gris por producto agrícola ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ).

- $\text{rend\_cult}$  = rendimiento del cultivo (t/ha).

En ríos poco alterados, a modo práctico, para contaminantes elaborados por el hombre, la concentración natural en el ambiente es cero (Hoekstra *et al.*, 2011, citado en CTA, 2013). En este caso se utilizó la concentración de N y P medido en el agua del río Pita, por lo que en la Ecuación (4) se reemplazó el valor de la concentración medida de N y P.

## **Subsector pecuario**

En este subsector se considera la información de pastos y el subsector bovino. La huella hídrica del sector se determina mediante la Ecuación (6) y ésta, al ser equiparable con las otras huellas, establece la Ecuación (7).

$$HH_{\text{pecuaria}} = HH_{\text{alimento}} + HH_{\text{consumo}} + HH_{\text{servidumbre}} \quad (6)$$

$$HH_{\text{pecuaria}} = HH_{\text{Verde Pe}} + HH_{\text{Azul Pe}} + HH_{\text{Gris Pe}} \quad (7)$$

Donde:

- $HH$  verde  $Pe$  = huella hídrica del alimento.
- $HH$  azul  $Pe$  = huella hídrica del consumo.
- $HH$  gris  $Pe$  = huella hídrica de servidumbre.

La huella hídrica pecuaria se da en  $m^3$  sobre tonelada de peso vivo obtenida de dividir el consumo total de agua expresada  $m^3$  de cada huella sobre el número de bovinos dentro de la microcuenca, multiplicado por su peso vivo promedio en toneladas. El número de bovinos se determinó en función de la capacidad de carga animal (Ecuación (8)), considerando que el número de bovinos en un área determinada está relacionado proporcionalmente con el área de pastos en ésta:

$$CCBovina = \frac{\# \text{ cabezas ganado}}{\text{Área de pastos}} \quad (8)$$

Donde:

- $CC$  Bovina = capacidad de carga animal de los bovinos (cabezas/ha).
- $\#$  cabezas ganado = número de cabezas de ganado por parroquia (cabezas).
- Área de pastos = área de pastos de cada parroquia (ha).

## Huella verde pecuaria

La huella hídrica verde pecuaria corresponde a consumo de agua por el pasto. Para el cálculo del rendimiento se consideraron los valores propuesto por Palacios en 2005, citado por el CTA (2013): 15 toneladas de materia seca (MS)/ha para pasto de ganado lechero; cinco toneladas de MS/ha para pasto de ganado de carne y ganado de carne/leche. De esta forma se obtiene el contenido de agua verde en m<sup>3</sup>/t y se multiplica por el requerimiento de materia seca de los bovinos, la cual se calcula mediante la Ecuación (9):

$$Req. MS \left( \frac{kg}{animal * día} \right) = \frac{Peso del animal vivo (kg) * 2.7\%}{100\%} \quad (9)$$

Donde:

- *Req. MS* = requerimiento de materia seca por animal.
- Peso animal vivo = peso en promedio de un bovino.
- 2.7 = % de requerimiento de materia seca en relación con el peso total del bovino.

El pasto predominante en la zona es el *Pennisetum clandestinum* (kikuyo) (Colimba, 2009). Se considera un pastoreo rotacional de entre

40 a 80 días y de 5 a 10 cortes en el año (Granizo, 2011). La raza es Holstein, con un peso promedio de 650 kg (Asociación Holstein Friesian del Ecuador, 2016). A su vez, según el SENA (1985), citado en el CTA (2013), estima que el consumo diario de materia seca es, en promedio, 2.7% de su peso vivo; el porcentaje de humedad en el pasto es de 80%, y el 20% restante se considera materia seca. Estos valores fluctúan en función de características propias de la zona y de tipo de pasto.

## **Huella azul pecuaria**

La huella hídrica azul pecuaria corresponde al consumo de agua requerido por los bovinos. Un adulto promedio de carne consumirá de 8 a 10% de su peso vivo de agua por día (Sager, 2000) y el ganado lechero consumirá un valor de 3 a 5 litros de agua por cada kilogramo de materia seca consumida.

## **Huella gris pecuaria**

La huella hídrica gris considera los valores de contaminantes del N contenidos en orina y heces de los bovinos, valores planteados por León *et al.* (2008), citado por (CTA, 2013), que no son diferentes por tipo de ganado de leche o carne:

- Tasa de lixiviación del nitrógeno: 10%.
- Excreción fecal de 210.9 (g N/día).
- Excreción urinaria de 240.6 (g N/día).

## Sector doméstico

La huella hídrica se determinó según la metodología diseñada por el Grupo de Investigaciones Ambientales (GIA) de la Universidad Pontificia Bolivariana y del Tecnológico de Antioquia, según Arango-Ochoa (2013). Se identifican tres volúmenes de control o etapas importantes en la huella del sector doméstico que corresponden a:

- Captación y potabilización del agua.
- Distribución y pérdidas por fugas técnicas y por acometidas ilegales.
- Consumo de los usuarios y sus vertimientos del agua a la microcuenca, ya sea con tratamiento previo o sin él.

## Huella azul doméstica

La Ecuación (10) hace referencia a los aportes en los procesos determinados en el sistema de agua potable:

$$HH \text{ azul TOTAL} = HH \text{ azul PTAP} + HH \text{ azul AI} + HH \text{ azul USU} \quad (10)$$

Donde:

- $HH$  azul total = huella hídrica azul total en  $m^3$ .
- $HH$  azul PTAP = huella hídrica azul de la planta de potabilización en  $m^3$ .
- $HH$  azul AI = huella hídrica azul de las acometidas ilegales en  $m^3$ .
- $HH$  azul USU = huella hídrica azul de los usuarios en  $m^3$ .

## Huella hídrica azul de los usuarios

En este aporte se consideró que un porcentaje del agua facturada es consumida por los usuarios, convirtiéndose en huella hídrica azul según la Ecuación (11) y el otro porcentaje se convierte en caudal de vertimiento. Según la Ecuación (11), se asume que 10% del agua facturada en el sector corresponde al aporte a la huella azul y el 90% restante corresponde a los vertimientos (Ecuación (12)):

$$HH \text{ azul } USU = 0.1 * Q cf \quad (11)$$

$$Q v USU = 0.9 * Q cf \quad (12)$$

Donde:

- $Qcf$  = caudal facturad por cada municipio ( $m^3$ ).
- $Q v USU$  = caudal de vertimiento por los usuarios ( $m^3$ ).

### **Huella hídrica azul de las acometidas ilegales**

El agua en la distribución sufre pérdidas por la infraestructura e incluso por captaciones ilegales. Se asume que 10% del caudal vertido en las

acometidas ilegales corresponde al aporte que repercuten en la huella azul, según la Ecuación (13):

$$HH \text{ azul } AI = 0.1 * Q e AI \quad (13)$$

Donde:

- $HH \text{ azul } AI$  = huella hídrica azul de las acometidas ilegales en  $\text{m}^3$ .
- $Q e AI$  = caudal vertido en las acometidas ilegales en  $\text{m}^3$ .

El caudal de las acometidas ilegales es determinado a partir de pérdidas totales en el sistema, en función de las Ecuaciones (14), (15) y (16):

$$Q p = \frac{Q \text{ total Distrib} * \% P}{100 \% - \% P} \quad (14)$$

$$AI = \% P - \% FT \quad (15)$$

$$Q e AI = Q p * \% AI \quad (16)$$

Donde:

- $Q p$  = caudal de pérdidas en  $\text{m}^3$ .

- $Q_{cf}$  total Distrib = caudal de distribución total en  $m^3$ .
- %  $P$  = porcentaje de pérdidas.
- %  $AI$  = porcentaje de acometidas ilegales.
- %  $FT$  = porcentaje de fugas técnicas.
- $Q_e AI$  = caudal de acometidas ilegales en  $m^3$ .

## **Huella hídrica azul de captación y potabilización**

El caudal que se importa desde la microcuenca sufre variaciones, ya sea por evaporación o pérdidas, y se lo contabilizó como huella azul en esta etapa a través de la Ecuación (17):

$$HH\ AZUL\ PTAP = Q\ Cap\ Cuenca - Q\ e\ PTAP \quad (17)$$

Donde:

- $HH\ AZUL\ PTAP$  = huella hídrica azul en la planta de potabilización ( $m^3$ ).
- $Q\ Cap\ Cuenca$  = caudal de captación en la microcuenca ( $m^3$ ).
- $Q\ e\ PTAP$  = caudal de entrada en la planta de potabilización en  $m^3$ .

## Huella gris doméstica

En el proceso de cuantificación de la huella hídrica gris se tomaron en consideración los contaminantes DBO<sub>5</sub>, DQO y SST; se calculó la huella gris en función de cada uno de estos contaminantes, y sólo se considera al valor máximo de los tres para la cuantificación de la huella a través de la Ecuación (18):

$$HH\ gris\ TOTAL = MAXIMA[HH\ gris\ total\ cont\ (DBO5, DQO, SST)]$$

$$HH\ gris\ TOTAL = HH\ gris\ PTAP + HH\ gris\ AI + HH\ gris\ USU \quad (18)$$

Donde:

- $HH\ gris\ TOTAL$  = huella hídrica gris total en m<sup>3</sup>.
- $HH\ gris\ PTAP$  = huella hídrica gris de la planta de potabilización en m<sup>3</sup>.
- $HH\ gris\ AI$  = huella hídrica gris de las acometidas ilegales en m<sup>3</sup>.
- $HH\ gris\ USU$  = huella hídrica gris de los usuarios en m<sup>3</sup>.

## Huella hídrica gris de los usuarios

Una parte del agua vertida por los usuarios es llevada a plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y el resto es vertido sin tratar, lo que implica un aporte a la huella gris; en ambos casos, estas huellas se determinan mediante las Ecuaciones (19), (20) y (21).

$$HH\ gris\ USU = HH\ gris\ ST + HH\ gris\ PTAR \quad (19)$$

$$HH\ gris\ ST = \frac{Q\ v\ ST * C\ v\ ST}{C\ max - C\ nat} \quad (20)$$

$$HH\ gris\ PTAR = \frac{Q\ v\ PTAR * C\ v\ PTAR}{C\ max - C\ nat} \quad (21)$$

Donde:

- $HH\ gris\ ST$  = huella hídrica gris sin tratamiento ( $m^3$ ).
- $Q\ v\ ST$  = caudal de vertido sin tratar ( $m^3$ ).
- $C\ v\ ST$  = concentración del contaminante de vertido sin tratar ( $kg/m^3$ ).
- $Q\ v\ PTAR$  = caudal de vertido, planta de tratamiento residual ( $m^3$ ).

- $C \nu PTAR$  = concentración del contaminante de vertido sin tratar ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).
- $C \text{ max}$  = concentración máxima del contaminante ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).
- $C \text{ nat}$  = concentración natural del contaminante en el afluente ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Los caudales de vertimiento sin tratar y de la planta de tratamiento se calcularon mediante la metodología de Arango-Ochoa (2013), según las Ecuaciones (22) y (23), respectivamente. Además se establece que el 30% del caudal total es tratado en una planta de tratamiento de aguas residuales:

$$Q \nu USU = Q \nu USU * \% Q \nu PTAR \quad (22)$$

$$Q \nu ST = Q \nu USU - Q \nu PTAR \quad (23)$$

Donde:

- $Q \nu PTAR$  = caudal tratado en una planta de tratamiento residual ( $\text{m}^3$ ).
- $Q \nu USU$  = caudal de vertido por los usuarios ( $\text{m}^3$ ).
- $\% Q \nu PTAR$  = % del caudal tratado en una planta de tratamiento residual ( $\text{m}^3$ ).

- $Q v ST =$  caudal de vertido sin tratar ( $m^3$ ).

### **Huella hídrica gris de las acometidas ilegales**

El porcentaje de aportación de los volúmenes de acometidas ilegales y de fugas técnicas es de 90%; se calculó mediante las Ecuaciones (24) y (25), respectivamente:

$$HH\ gris\ AI = \frac{Q\ v\ AI * C\ v\ AI}{C\ max - C\ nat} \quad (24)$$

$$Q\ v\ AI = 0.9 * Q\ e\ AI \quad (21)$$

Donde:

- $HH\ gris\ AI$  = huella hídrica gris de las acometidas ilegales en  $m^3$ .
- $Q\ e\ AI$  = caudal de vertido en las acometidas ilegales en  $m^3$ .
- $Q\ v\ AI$  = caudal de vertido en acometidas ilegales en  $m^3$ .
- $C\ v\ AI$  = concentración del contaminante vertido en acometidas ilegales ( $kg/m^3$ ).

## Huella hídrica gris en la etapa de captación y potabilización

En la planta de potabilización, el agua de vertimiento es la resultante de los procesos operacionales de la planta. Este volumen se contabiliza como huella hídrica gris (Ecuación (26)):

$$HH\ GRIS\ PTAP = \frac{Q\ V\ PTAP * C\ V\ PTAP}{C\ max - C\ nat} \quad (26)$$

Donde:

- $HH\ GRIS\ PTAP$  = huella hídrica gris en la planta de potabilización ( $m^3$ ).
- $Q\ V\ PTAP$  = caudal de vertido por la planta de potabilización ( $m^3$ ).
- $C\ V\ PTAP$  = concentración de vertido por la planta de potabilización ( $m^3$ ).

## Sector minero

La huella hídrica se determinó para materiales pétreos (arena y grava), considerando el área de cada título minero a través de las interrelaciones en función de la producción que genera; se multiplicó por el indicador estimado y se cuantificó la huella azul y gris. Este indicador se determinó en función de la metodología propuesta por la *Water Footprint Network* (WFN, 2011) (Hoekstra, Chapagain, & Aldaya, 2011), citado en CTA (2013). Las propiedades de las arenas y gravas se tomaron de Escobar y Rivas (2016):

- La densidad promedio de la arena es 2 649 kg/m<sup>3</sup>; la de la grava, 2 610 kg/m<sup>3</sup>.
- El porcentaje de absorción de agua en la arena es 4.05%; en la grava, 3.6% en peso.
- El contenido de humedad de la arena es 2.08%; el de la grava, 0.09%.

En la huella gris, el principal contaminante son los sólidos suspendidos totales.

### **Huella azul minera**

El indicador de huella se obtuvo a través de la Ecuación (27):

$$Indicador\ HHA = \left( \frac{(\% \ de \ absorción \ de \ agua \ en \ peso) * (\text{peso} \ del \ material \ explotado) \left( \frac{m^3 \ agua}{año} \right)}{\frac{\text{producción} \left( \frac{m^3 \ material}{año} \right)}{\text{Densidad promedio} \frac{kg \ material}{m^3 \ material}}} \right) \quad (27)$$

La huella hídrica de cada material se determinó según la Ecuación (28):

$$HH\ Azul\ M = Indicador\ HHA * Prod\ pond\ area \quad (28)$$

Donde:

- $HH\ Azul\ M$  = huella hídrica azul en la minería ( $m^3$ ).
- $Indicador\ HHA$  = indicador de huella hídrica azul por material ( $m^3/kg$  material).
- $Prod\ pond\ área$  = producción de las concesiones en función de su área ( $kg$  material).

## Huella gris minera

El indicador de huella hídrica gris se determinó en función del valor de la carga aportante promedio de SST (Ecuación (29)), obtenido en los análisis de aguas del río Pita:

$$Indicador\ HHG = \left( \frac{\frac{Carga\ contaminante\ (\frac{kg\ SST}{dia})}{producción\ (\frac{kg\ material}{dia})}}{(C_{max}-C_{nat})\frac{kg\ SST}{m^3\ agua}} \right) \quad (29)$$

La huella hídrica gris total de los SST para arenas y gravas se determinó con la Ecuación (30).

$$HH\ Gris\ M = Indicador\ HHG * Prod\ pond\ area \quad (30)$$

Donde:

- *HH Gris M* = huella hídrica gris en la minería ( $m^3$ ).
- *Indicador HHG* = indicador de huella hídrica gris por material ( $m^3/kg$  material).
- *Prod pond área* = producción de las concesiones en función de su área ( $kg$  material).

## Sector energético

En este sector se consideró la generación de las centrales hidroeléctricas inmersas en la zona (Tabla 3), que tengan reservorio de agua y no estén en la microcuenca, además de la potencia instalada obtenida de la Corporación Eléctrica del Ecuador (Celec) (Celec, 2016) y fundamentada en la Norma Técnica Ecuatoriana GPE INEN 59:2012 (INEN, 2012).

**Tabla 3.** Central hidroeléctrica en la microcuenca.

Central hidroeléctrica (INEN, 2012)	Nombre	Capacidad instalada	Reservorio	Reservorio dentro de microcuenca	Eficiencia (12 meses del año)
<b>Mediana</b>	Guangopoloo I y II	74.45 MW	Sí	No	100%

La metodología de cálculo de la huella hídrica energética es la propuesta por Mekonnen y Hoekstra (2011). Además, para los cálculos se estableció un factor de conversión a Gigajulio de 3.6.

## Huella azul energética

La huella hídrica azul de la energía en una central hidroeléctrica se calculó dividiendo la cantidad de agua evaporada del embalse entre el total de energía generada (Ecuación (31)):

$$HH\ Azul\ E = \frac{AE\ (m^3)}{EG\ (GJ)} \quad (31)$$

Donde:

- $HH\ Azul\ E$  = huella hídrica azul energética ( $m^3/GJ$ ).
- $AE$  = volumen de agua evaporada desde el embalse ( $m^3$ ).
- $EG$  = energía generada (GJ).

El volumen de agua que se evapora desde el embalse se calculó en función de la Ecuación (32):

$$AE = 10 * E * A \quad (32)$$

Donde:

- $AE$  = volumen de agua evaporada desde el embalse ( $m^3$ ).
- $E$  = evaporación mensual del embalse (mm).

- $A$  = área del reservorio de agua (ha).

La evaporación se determinó por el método propuesto de Thomthwaite (1948), citado en Montaner & Sánchez-Almohalla (1988). El cual comprobó que la evapotranspiración es proporcional a la temperatura media, según la Ecuación (33):

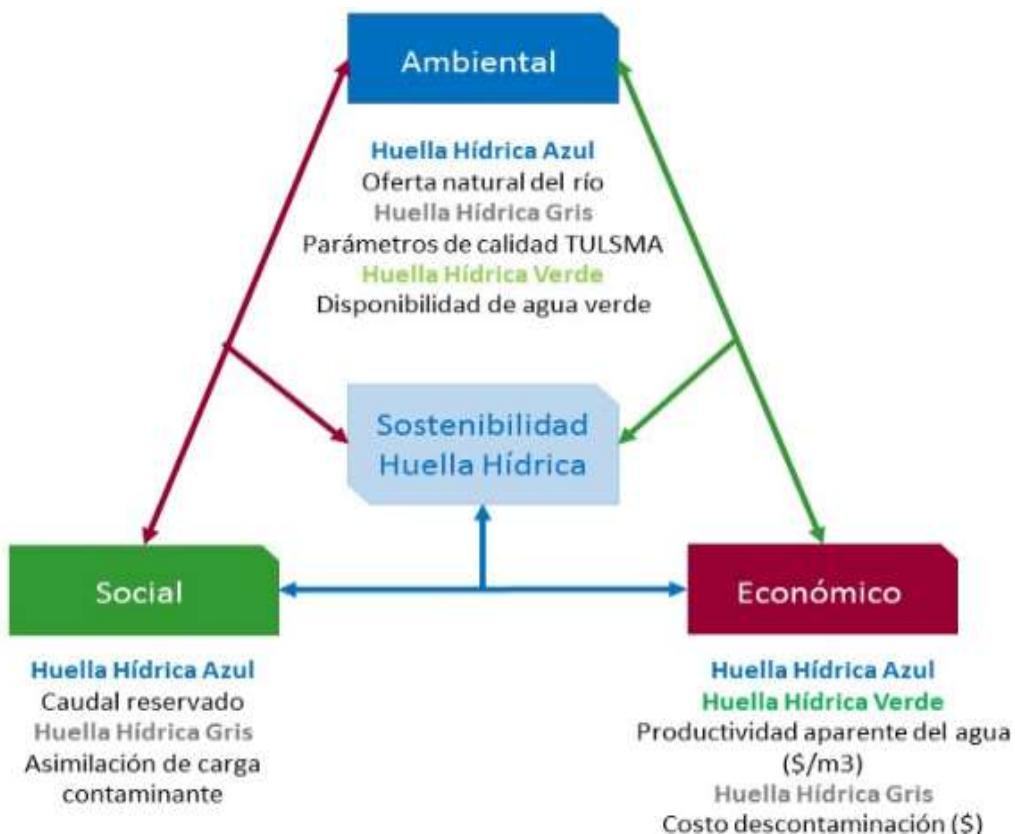
$$E = 16 \left( \frac{10 T_m}{I} \right)^a \quad (33)$$

Donde:

- $E$  = evapotranspiración mensual sin ajuste (mm/mes).
- $T_m$  = temperatura media mensual en °C.
- $I$  = índice de calor anual.
- $a$  = parámetro ajustado.

## Análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica

En la Figura 2 se representa un esquema de la sostenibilidad aplicada, donde se indican las variables necesarias que involucra cada enfoque sistema de la sostenibilidad.



**Figura 2.** Sostenibilidad de la huella hídrica en la microcuenca.

Fuente: adaptado del CTA (2013).

## Análisis ambiental huella azul

Este análisis se determinó a través del índice de escasez, al comparar la huella azul con la oferta natural disponible total y regulada, según las Ecuaciones (34) y (35), respectivamente. Además, en cada oferta se detrajo la huella hídrica azul, porque esa agua ya no está disponible en el medio:

$$Et\ Azul\ mes = \frac{\sum HH\ azul\ mes}{OA\ azul\ t.mes} \quad (34)$$

$$Er\ Azul\ mes = \frac{\sum HH\ azul\ mes}{OA\ azul\ r.mes} \quad (35)$$

Donde:

- $Et\ Azul\ mes$  = índice de estrés hídrico azul total.
- $Er\ Azul\ mes$  = índice de estrés hídrico azul regulado.
- $HH\ azul\ mes$  = huella hídrica azul mensual.
- $OA\ azul\ t.\ mes$  = oferta de agua azul total por mes.
- $OA\ azul\ r.\ mes$  = oferta de agua azul regulada por mes.

## La oferta de agua azul total

Se obtuvo a partir de la oferta natural de agua en la microcuenca (volumen escurrido), descontado el caudal ecológico (Ecuación (36)). La oferta de agua regulada se obtuvo descontando el caudal ecológico, y el caudal extracción o consumo del total (Ecuación (37)):

$$OA \text{ azul t. mes} = Oferta \text{ Nat. mes} - Caudal \text{ Eco. mes} \quad (36)$$

$$OA \text{ azul t. mes} = Oferta \text{ Nat. mes} - Caudal \text{ Eco. mes} - Caudal \text{ Con. mes} \quad (37)$$

Donde:

- $OA \text{ azul t. mes}$  = oferta de agua azul total por mes ( $m^3$ ).
- $Oferta \text{ Nat. mes}$  = agua producida por la microcuenca por mes ( $m^3$ )
- $Caudal \text{ Eco. mes}$  = caudal ecológico mensual ( $m^3$ ).
- $Caudal \text{ Con. mes}$  = caudal de extracción para consumo ( $m^3$ ).

## La oferta natural

Se determina a través del volumen escurrido de la microcuenca mediante la Ecuación (38):

$$Ve = 31.536 * Qo * 10^6 \quad (38)$$

Donde:

- $Ve$  = volumen escurrido ( $m^3$ ).
- $Qo$  = caudal medio de la microcuenca ( $m^3/s$ ).
- 31.536 = constante de cuantificación.

## Caudal medio

Es común que el caudal medio en una cuenca hidrológica se exprese únicamente en función del área (Ecuación (39)) (Sandoval, 2014, citado en Morales & Topón, 2016):

$$Qo = \frac{31.71 * P * C * Ac}{10^6} \quad (39)$$

Donde:

- $Q_o$  = caudal medio de la microcuenca ( $m^3/s$ ).
- $V_e$  = volumen escurrido ( $m^3$ ).
- $P$  = precipitación media ponderada multianual (mm).
- $A_c$  = área de la microcuenca ( $km^2$ ).
- $C$  = coeficiente de escorrentía.

El coeficiente de escorrentía se obtuvo del *Soil Conservation Services*, en función de los criterios propios de la microcuenca con valor igual a 0.4 (Cisneros & Díaz, 2016).

## La precipitación media

Se determinó por el “Método aritmético”, en el cual se calculó el promedio numérico de las alturas de precipitación, registrado por ocho estaciones meteorológicas, para lo cual se emplea la Ecuación (40):

$$P = \frac{1}{n} \sum_i^n P_i \quad (40)$$

Donde:

- $n$  = número de estaciones.
- $P_i$  = precipitación registrada en la estación (mm).

Este método es aceptado cuando la dispersión es < 10% de la sumatoria de precipitación anual calculada. Además, cabe mencionar que para aplicar este procedimiento es necesario contar con un compendio de datos de al menos cinco años.

- Caudal ecológico. En Ecuador, según las normas técnicas ambientales, el caudal ecológico es el 10% del caudal medio mensual multianual.
- Caudal de extracción. Caudal de consumo, se obtuvo a partir de las captaciones realizadas en el río Pita por parte de los municipios de Quito y Rumiñahui. Valores que fueron de 1 200 y 220 l/s, respectivamente, para el año 2016.

## Análisis ambiental huella verde

La sostenibilidad ambiental verde se determinó a través del índice de escasez, comparando en cada mes la *HH* verde total de la microcuenca con la disponibilidad de agua verde (Ecuación (41)):

$$E\ Verde\ mes = \frac{\sum HH\ verde\ mes}{DA\ verde\ mes} \quad (41)$$

Donde:

- *Et Verde mes* = índice de estrés hídrico verde.
- *HH verde mes* = huella hídrica verde mensual ( $m^3$ ).
- *DA verde mes* = disponibilidad de agua verde mensual ( $m^3$ ).

La disponibilidad de agua verde se determinó en función de la evapotranspiración real total menos la evapotranspiración natural y la de las zonas no productivas de manera mensual, según la Ecuación (42):

$$DAV = ET\ verde - ET\ natural - ET\ noproductiva \quad (42)$$

Donde:

- *DAV* = disponibilidad de agua verde ( $m^3$ ).
- *ET verde* = evapotranspiración total verde ( $m^3$ ).

- $ET \text{ natural}$  = evapotranspiración reservada para la vegetación natural ( $\text{m}^3$ ).
- $ET \text{ no productiva}$  = evapotranspiración del suelo no productivo ( $\text{m}^3$ ).

La evotranspiración real (ETR) anual se estimó usando el método de Budyko (1974) citado en Rodríguez-Ortiz, 2016. Se basa en los balances de agua y energía a largo plazo, la metodología planteada por Budyko tiene una escala temporal anual (Rodríguez-Ortiz, 2016), por lo que para obtener el valor mensual se realiza una asignación de la ETR a través de la ETP (Ecuación (43)):

$$ETR = \left[ ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) \left(1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \operatorname{senh}\left(\frac{ETP}{P}\right)\right) \right]^{1/2} \quad (43)$$

Donde:

- $ETR$  = evapotranspiración real ( $\text{mm/año}$ ).
- $ETP$  = evapotranspiración potencial ( $\text{mm/año}$ ).
- $P$  = precipitación ( $\text{mm/año}$ ).

La  $ETR$  correspondiente a las zonas no productivas, sin vegetación, naturales o de protección, y zonas donde están los cuerpos de agua de la

microcuenca; se determinó a través de la ETP de estas zonas, para lo cual se estableció el área y se aplicó la ecuación de Thornthwaite en cada zona.

### Análisis ambiental huella gris

La sostenibilidad en la huella hídrica gris se evaluó determinando el "Nivel de contaminación de agua (NCA)" (Ecuación (44)), comparando la oferta real total mensual de agua en la microcuenca, descontado la huella hídrica azul, ya que esa agua no está disponible en el medio para asimilar la carga contaminante generada:

$$Et\ Gris\ mes = \frac{\sum HH\ gris\ mes}{DA\ azul\ mes} \quad (44)$$

Donde:

- *Et Gris mes* = índice de estrés hídrico gris.
- *HH gris mes* = huella hídrica gris mensual ( $m^3$ ).
- *DA azul mes* = oferta natural regulada de agua en la microcuenca ( $m^3$ ).

Los índices del NCA calculados reflejan el grado o porcentaje de contaminación del cuerpo receptor por mes. Se consideró además que si la insostenibilidad es recurrente en la mayoría de los meses, el cuerpo de agua tendría copada y superada su capacidad de depuración, denotando así la no sostenibilidad en términos de calidad, en función del criterio:

- $E < 1$ ; sostenibilidad.
- $E = 1$ ; utiliza el agua azul y verde total. respectivamente.
- $E > 1$ ; insostenibilidad.

## Análisis económico huella azul

Salmoral *et al.* (2011) plantea que se debe estimar el valor de producción a precios de mercado por m<sup>3</sup> de agua consumida, determinando la productividad aparente del agua azul, ya que esto manifiesta la capacidad de generación de ingresos en relación con el consumo de agua; además que considera como un factor dinámico que evoluciona en el tiempo (CTA, 2013). Los recursos naturales son “activos fijos”. Con el fin de gestionar sosteniblemente dicho recurso hasta llegar a un agotamiento óptimo, en cada sector se establece:

- Agrícola. La productividad aparente del agua azul (APW azul) de la agricultura se estimó dividiendo el precio del producto agrícola sobre su huella azul, según la Ecuación (45):

$$APW \text{ azul} = \frac{\text{Valor producción cultivo}}{\text{HH Azul cultivo}} \quad (45)$$

Donde:

- $APW \text{ azul}$  = productividad aparente del agua azul ( $\$/\text{m}^3$ ).
- $\text{Valor producción cultivo}$  = precio de mercado del producto ( $\$/\text{t}$ ).
- $\text{HH Azul cultivo}$  = huella hídrica azul de cada cultivo ( $\text{m}^3/\text{t}$ ).

Además, se calculó la productividad aparente de la tierra (APL), misma que representa el valor económico a precios constantes en función de las hectáreas cultivadas, para lo cual se determina precio de mercado del producto por su rendimiento; esto, según la Ecuación (46):

$$APL = Pm * \text{Rendimiento} \quad (46)$$

Donde:

- $APL$  = productividad aparente de la tierra ( $\$/\text{ha}$ ).
- $Pm$  = precio de mercado del cultivo ( $\$/\text{t}$ ).

- *Rendimiento* = rendimiento de un cultivo en una hectárea (t/ha).
  - Pecuario. La productividad aparente del agua (APW azul) pecuaria se estimó dividiendo el precio de la producción de carne bovina sobre la huella azul asociada con este sector (Ecuación (47)):

$$APW \text{ azul} = \frac{\text{Valor producción de carne}}{HH \text{ azul pecuaria}} \quad (47)$$

Donde:

- *APW azul* = productividad aparente del agua azul (\$/m<sup>3</sup>).
- *HH azul pecuaria* = huella hídrica azul de cada cultivo (m<sup>3</sup>/año).
- *Valor producción carne* = precio de mercado del ganado en peso vivo por el peso promedio del ganado y por número de cabezas de ganado (\$/año).
- Energía. La productividad aparente del agua (APW Azul) del sector se estimó dividiendo el precio del kWh de energía en el mercado. Se asumió en 0.068 \$, como referencial a la tasa residencial-R1 (EEQ, 2014) (Ecuación (48)):

$$APW \text{ azul} = \frac{\text{Valor producción de la energía}}{HH \text{ Azul energética}} \quad (48)$$

Donde:

- $APW \text{ azul}$  = productividad aparente del agua azul ( $$/\text{m}^3$ ).
- $HH \text{ azul energética}$  = huella hídrica azul del sector energía ( $\text{m}^3/\text{año}$ ).
- $\text{Valor producción de la energía}$  = precio de mercado del kWh por la energía generada en la planta ( $$/\text{año}$ ).
- Minería. La productividad aparente del agua (APW Azul) del sector se estimó dividiendo el precio promedio de arenas y gravas entre la huella azul asociada con este sector (Ecuación (49)):

$$APW \text{ azul} = \frac{\text{Precio promedio pétreos * producción de pétreos}}{HH \text{ azul minera}} \quad (49)$$

Donde:

- $APW \text{ azul}$  = productividad aparente del agua azul ( $$/\text{m}^3$ ).
- $HH \text{ azul minera}$  = huella hídrica azul del sector minero ( $\text{m}^3/\text{año}$ ).
- $\text{Producción de los pétreos}$  = material, arenas y gravas producidos en las concesiones mineras ( $\text{kg/año}$ ).

- *Precio promedio pétreos* = costo de mercado de 1 m<sup>3</sup> de área y grava multiplicado por su densidad. (\$/kg).
- Doméstico. La productividad aparente del agua (APW azul) del sector se estimó dividiendo el precio del m<sup>3</sup> de agua en el mercado entre la huella azul del sector (Ecuación (50)). El precio referencial de m<sup>3</sup> de 0.31\$ se obtuvo del pliego tarifario doméstico (EPMAPS, 2017):

$$APW \text{ azul} = \frac{\text{Valor producción del agua potable}}{HH \text{ azul doméstica}} \quad (50)$$

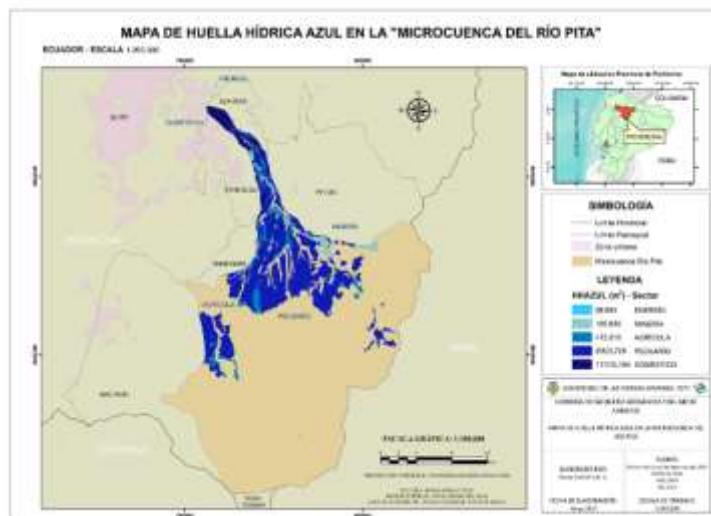
Donde:

- *APW azul* = productividad aparente del agua azul (\$/m<sup>3</sup>).
- *HH azul doméstica* = huella hídrica azul del sector doméstico (m<sup>3</sup>/año).

Valor producción del agua potable = precio de mercado del m<sup>3</sup> por el agua facturada en los municipios de Quito y Rumiñahui (\$/año).

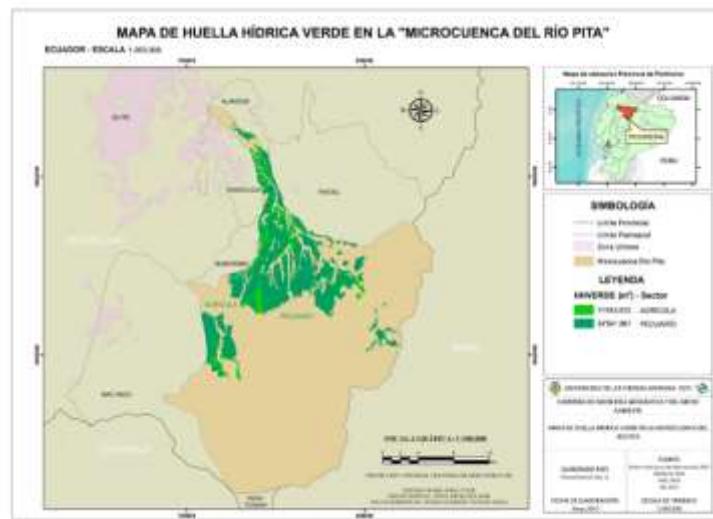
## Resultados y discusiones

Se muestra geográficamente las variaciones y aportaciones de huella hídrica de cada sector económico analizado, disagregados por su color respectivo. En la huella azul, el mayor aporte es el sector doméstico, con 17 Mm<sup>3</sup>; el que menor aportación tiene es el energético, con 0.058 Mm<sup>3</sup> (Figura 3.1).



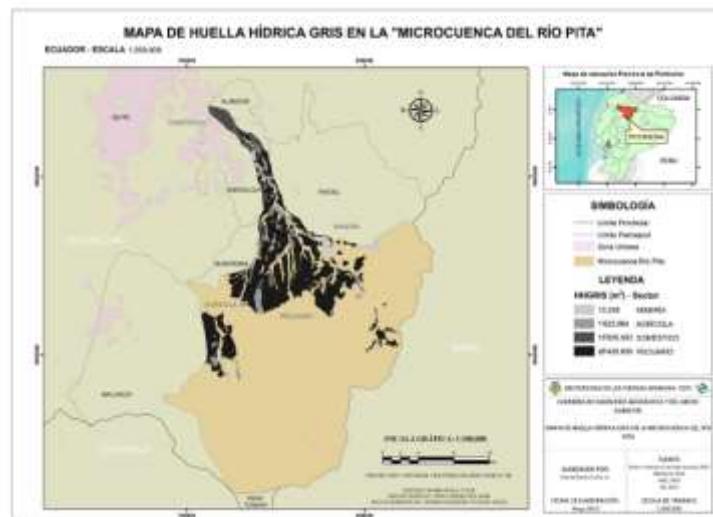
**Figura 3.1.** Huella hídrica azul en la microcuenca.

En la huella verde, el mayor aporte es el sector pecuario con 17 Mm<sup>3</sup> y el agrícola con 11.64 Mm<sup>3</sup> (Figura 3.2).



**Figura 3.2.** Huella hídrica verde en la microcuenca.

Además, en la huella gris, el sector que más aporta es el pecuario, con  $28 \text{ Mm}^3$ ; el que menor aportación tiene es el minero, con  $0.013 \text{ Mm}^3$  (Figura 3.3).



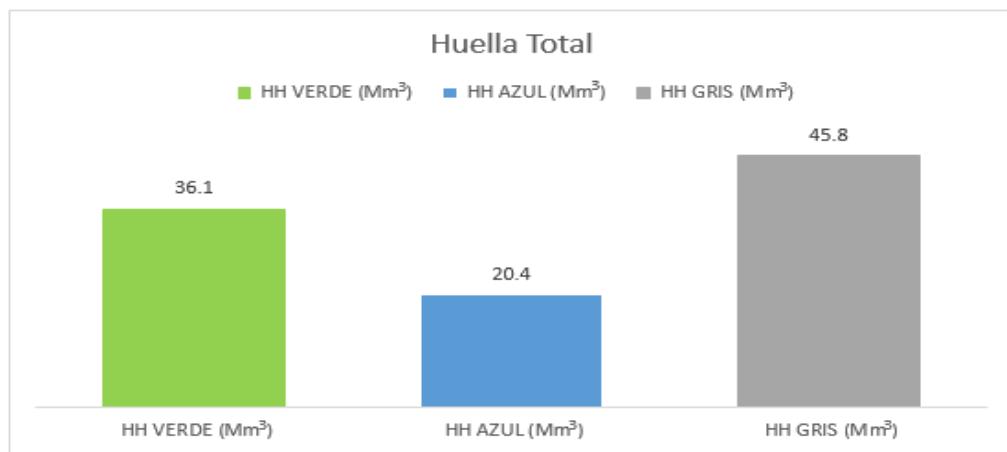
**Figura 3.3.** Huella hídrica gris en la microcuenca.

El compendio de los cinco sectores antes mencionados se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Huella hídrica microcuenca.

<b>Sector</b>	<b>HH verde (Mm<sup>3</sup>)</b>	<b>HH azul (Mm<sup>3</sup>)</b>	<b>HH gris (Mm<sup>3</sup>)</b>
Agrícola	11.64	0.47	1.62
Pecuario	24.54	2.80	28.43
Doméstico		17.01	15.84
Minero		0.10	0.01
Energético		0.06	
Total	36.19	20.45	45.90

La suma de las huellas hídricas se muestran en la Figura 4, en el que la huella hídrica azul es de  $20.4 \text{ Mm}^3$ ; la huella hídrica verde es de  $36.1 \text{ Mm}^3$ , y la huella gris es de  $45.8 \text{ Mm}^3$  de agua.

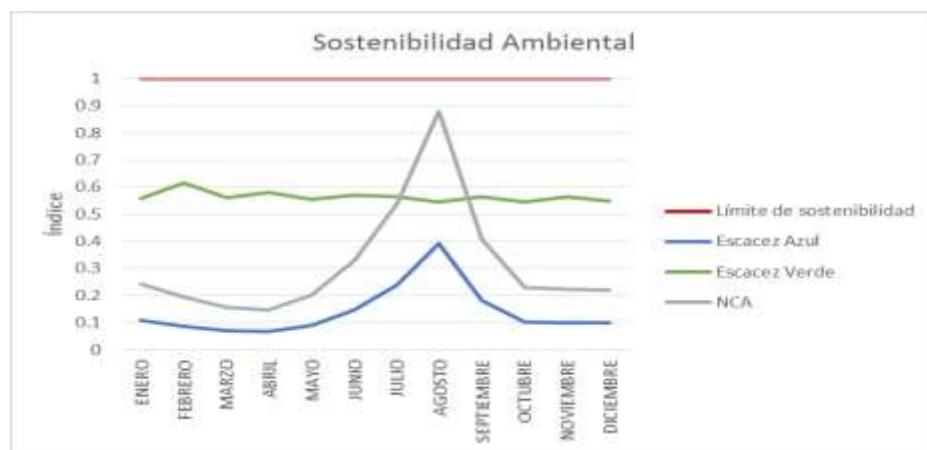


**Figura 4.** Huella hídrica total en la microcuenca.

## Sostenibilidad ambiental huella hídrica

La oferta natural de agua azul es de  $261.7 \text{ Mm}^3$ , mientras que la oferta regulada es de  $188.9 \text{ Mm}^3$ ; la disponibilidad de agua verde (DAV) es de  $64 \text{ Mm}^3$ . Estas estimaciones servirán para establecer la relación y el grado de sostenibilidad de la microcuenca mediante los índices de escasez y el

nivel de contaminación NCA que denota la capacidad de autodepuración de la microcuenca al efectuar las relaciones respectivas entre cada oferta y huella hídrica; se determina la sostenibilidad para cada mes (Figura 5).



**Figura 5.** Sostenibilidad ambiental, huella hídrica.

El índice azul calculado cada mes es menor que uno en los meses de julio, septiembre y, en especial, agosto. Se observa que el consumo de agua en esta época es de un 40% de la oferta de agua regulada disponible.

El índice verde supera el 0.5; ello denota que el consumo de agua verde en estos meses es más del 50% de la oferta de agua verde disponible.

El índice NCA calculado es menor que uno. Se debe considerar que en los meses de mayo a octubre tiende a subir, llegando al punto más crítico en agosto, con un índice de 0.88, lo que denota que la capacidad

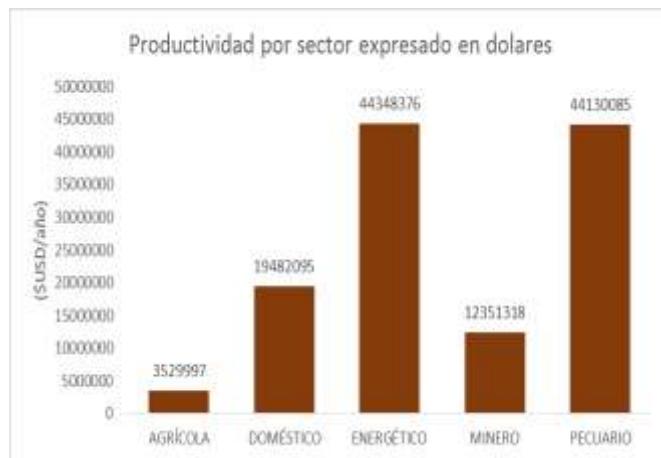
de asimilación y depuración de contaminantes en tal época está en 88% de su capacidad.

## **Sostenibilidad económica huella hídrica**

En la Figura 6 se muestra la variabilidad económica a partir del indicador APW, en el que se puede comprobar cuáles son los sectores más productivos por cada  $m^3$  de agua consumido en un año, siendo el energético y minero, con 753.8 y 238.4 USD/ $m^3$ , respectivamente. Estos valores son muy distantes de los otros sectores debido a que se consideró una eficiencia a su máxima capacidad en generación y explotación. En cambio, en la Figura 7 se muestra la variabilidad monetaria por cada sector que generaría en un año de producción.



**Figura 6.** APW por sector.



**Figura 7.** Producción generada en \$USD.

Según la Figura 6 y Figura 7, los sectores que generaron mayor producción expresada en dólares son el energético y el pecuario, con cerca de USD 44.5 millones, pues se consideró una productividad del 100%.

## Conclusiones

- El sector doméstico genera una huella hídrica azul con valor de 17.01 millones de m<sup>3</sup>, producto de las captaciones realizadas de 30 y 50% por los municipios de Quito y Rumiñahui, respectivamente, con el fin de satisfacer las necesidades de la población en estos cantones.
- La aportación del sector energético se cuantificó en 0.06 millones de m<sup>3</sup>; es la menor en este tipo de huella debido a que se utilizan grandes volúmenes de agua para generar energía y ésta no se transforma en huella hídrica, ya que el líquido después del proceso de generación es canalizado mediante tuberías y reutilizada en otras centrales fuera del área de la microcuenca, pero se mantiene disponible en el ecosistema sin ser alterada su calidad.
- En la huella hídrica verde se tiene dos aportaciones: el sector pecuario, que llega a 24.54 millones de m<sup>3</sup>, mientras que el sector agrícola alcanza 11.64 millones de m<sup>3</sup>. La producción que genera abastece al mercado local y no corresponde a una producción a gran escala. Es importante destacar la diferencia de m<sup>3</sup> en la huella verde

comparando los dos sectores, siendo la relación 2:1, lo cual evidencia el costo ambiental hídrico de la producción pecuaria.

- En la huella hídrica gris, el mayor aporte es el sector pecuario, con 28.43 millones de m<sup>3</sup>. Este valor es considerable, al ser altos los requerimientos de agua para asimilar la concentración de nitrógeno contenido en las heces de los bovinos, llegando por escurreimiento a los cauces naturales y generando contaminación difusa en la zona.
- Otro de los sectores que tiene una contribución considerable en la huella gris es el doméstico, con 15.84 millones de m<sup>3</sup>, volumen de agua que se necesita para asimilar la carga contaminante de DBO<sub>5</sub> ya que la población genera contaminación y es proporcional al consumo presentado; el que menos aporta es el sector minero, con 0.01 millones de m<sup>3</sup>; esto es consistente por la baja producción minera que se ha consultado, denotando así una diferencia notable con base en la capacidad productiva de cada sector.
- La microcuenca del río Pita presenta una oferta natural media anual de 313.45 millones de m<sup>3</sup> de la cual 10% se considera como caudal ecológico; la oferta natural regulada de agua es de 188 millones de m<sup>3</sup>, descontando la huella hídrica azul y el caudal de captación, del que se estima 11% ya no está disponible en el medio. También se cuantificó la disponibilidad de agua verde de 64.19 millones de m<sup>3</sup> del cual un 56% ya se consumió; esto, según las estimaciones realizadas. Tales ofertas son cuantificadas a partir de una

precipitación media de 1 322.81 mm/año, determinada en función de ocho estaciones meteorológicas en el periodo comprendido entre 1980 y 2010; una evapotranspiración potencial de 624.84 mm/año, establecida por la temperatura media anual entre 6 y 14°C, y una evapotranspiración real de 550.84 mm/año.

- La microcuenca del río Pita muestra sostenibilidad para consumo a la fecha, y disponibilidad y capacidad de depuración de agua a partir de los indicadores establecidos. En los tres casos, estos indicadores son menores que uno, característica que denota sostenibilidad, según la metodología planteada.
- El índice de escasez azul calculado para la oferta regulada de agua se encuentra entre 0.08 y 0.1 para los meses lluviosos, y de 0.2 a 0.4 para los meses secos. Dichos valores son consecuentes con la época de lluvia y seca, ya que la disponibilidad real de agua es alta, además de que los requerimientos de los sectores es mesurada, mientras que para la oferta total de agua se tiene un índice inferior a 0.15, no haciendo distinción notoria entre cada época. Este indicador varía en el tiempo principalmente por el aumento de la población, ya que para satisfacer las necesidades de alimentación, vestimenta y servicios se necesitan más requerimientos primarios, principalmente agua, por lo que generarían presión entre los otros sectores económicos para pugnar por más asignación del recurso, incrementando por tanto la demanda del agua y disminuyendo en consecuencia la oferta presentada.

- El índice de escasez verde calculado está entre 0.5 y 0.6, con una variabilidad ínfima entre cada mes; la pugna de agua en este sector se vuelve variable, pues la necesidad de alimentos agrícolas y cárnicos es directamente proporcional al crecimiento de la población, la cual debe satisfacer sus necesidades básicas, por lo que en estos sectores se incrementarán los requerimientos.
- El índice NCA se encuentra entre 0.15 y 0.19 para los meses lluviosos, y de 0.33 a 0.88 en los meses secos. La producción de los sectores acarrea contaminación que llega a los afluentes naturales. En la actualidad es asimilada sin problema, ya que la microcuenca presenta un 24% de su capacidad depurativa. Sin embargo, las consideraciones antes planteadas del incremento de los requerimientos por sector en el tiempo conllevan que aumente y disminuya la cantidad de agua disponible para asimilar la contaminación generada.
- En cuanto a la productividad aparente del agua APW, el sector más productivo es el energético, con 753.8 USD/m<sup>3</sup>. Sin embargo, esto se debe a que se consideró para este sector la capacidad máxima de generación. Dicha consideración también se aplicó en el sector minero, en el que su productividad es de 238.4 USD/m<sup>3</sup>. En el caso de los sectores menos productivos —agrícola, pecuario y doméstico—, se reciben 22.24, 7.83 y 2.39 USD/m<sup>3</sup>, respectivamente.

- La huella hídrica azul de acuerdo con la productividad generada, expresada en dólares para un año típico, corresponde a: sector agrícola, con USD 3.5 millones, a diferencia del sector energético y pecuario, que juntos aportan USD 44 millones. La asignación no pasa sólo por un filtro económico, pues se entendería que teóricamente se debería asignar más agua a los dos sectores más productivos, así generaría más riqueza, pero no se puede limitar o reducir a los otros sectores, ya que ahí se encuentra el núcleo poblacional; esto, en ningún caso es viable.

## Referencias

- Arango-Ochoa, J. (2013). *Determinación de la huella hídrica del sector doméstico en la cuenca del río Porce* (tesis pregrado). Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería Química, Medellín, Colombia.
- Asociación Holstein Friesian del Ecuador. (2016). *Holsteinecuador*. Recuperado de <http://holsteinecuador.com/clasificacion-lineal.html>
- Celec, Corporación Eléctrica del Ecuador. (2016). *Metas cumplidas de celec ep. Termopichincha en el 2016*. Quito, Ecuador: Corporación Eléctrica del Ecuador. Recuperado de <https://www.celec.gob.ec/termopichincha/php/ano-2016>
- Cisneros, J., & Díaz, E. (2016). *Diseño de una obra de mitigación ante el flujo de los lahares del volcán Cotopaxi que confluyen al río Pita en*

*el cauce norte sector La Caldera* (tesis pregrado). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ciencias de la Tierra y Construcción, Ingeniería Civil, Sangolquí, Ecuador.

Colimba, C. (2009). *Evaluación de parámetros productivos y reproductivos de la crusa bovina montbeliarde con razas lecheras de las haciendas el Relicario y Guagrabamba en la provincia de Pichincha* (tesis pregrado). ESPE-IASA I, Sede El Prado, Facultad de Ingeniería de Ciencias Agropecuarias, Sangolquí, Ecuador.

CTA, Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia. (2013). *Guía metodológica de aplicación de huella hídrica en una cuenca. Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia*. Antioquia, Colombia: Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE). Recuperado de <https://www.shareweb.ch>

EEQ, Empresa Eléctrica Quito. (2014). *Pago tarifario vigente*. Quito, Ecuador: Empresa Eléctrica Quito. Recuperado de <https://www.eeq.com.ec:8443/PLIEGO+TARIFARIO+MARZO+2014/784c96b6-94e4-49a0-b505-8b78638d9687>

EPMAPS, Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento. (2017). *Pliego tarifario EPMAPS*. Quito, Ecuador: Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento. Recuperado de [https://www.aguaquito.gob.ec/tarifario\\_epmaps.pdf](https://www.aguaquito.gob.ec/tarifario_epmaps.pdf)

Escobar, X., & Rivas, J. (2016). *Uso de espuma flex como agregado para la elaboración de adoquines de hormigón* (tesis pregrado). UCE, Carrera de Ingeniería Civil, Quito, Ecuador.

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2007). *Las cuencas y la gestión del riesgo a los desastres naturales en Guatemala*. Ciudad de Guatemala, Guatemala: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Recuperado de <http://coin.fao.org/coin-static/cms/media/5/20de20cuencas.pdf>

Freile, J., & Fabara, J. (marzo-abril, 2009). La sublime y trágica historia del valle del Pita. *Ecuador Terra Incógnita* (58). Recuperado de [http://www.terra/revista\\_pita.html](http://www.terra/revista_pita.html)

Granizo, O. (2011). *Estudio de factibilidad para la producción de un hato lechero en condiciones de estabulación, alimentado con maralfalfa (Pennisetum sp.) en la parroquia de Mindo-Pichincha* (tesis pregrado). Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Agricultura, Alimentos y Nutrición, Quito, Ecuador.

INEN, Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2012). *Guía de práctica para el desarrollo de estudios inventario, prefactibilidad, factibilidad y diseño definitivo de proyectos de generación hidroeléctrica. Norma, Quito*. Recuperado de <https://ia601900.us.archive.org/35/.2012/ec.gpe.59.2012.pdf>

MAE, Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2012). *Plan de manejo adaptativo del sistema de agua potable Pita-Puengasí y sus cuencas abastecedoras*. Quito, Ecuador: Ministerio del Ambiente.

MAE, Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2015). *Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua libro VI anexo 1, Quito-2015.* Quito, Ecuador: Ministerio del Ambiente.

Mekonnen, M., & Hoekstra, A. (2011). The blue water footprint of electricity from hydropower. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9. Department of Water Engineering and Management, Univ. of Twente, The Netherlands. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/d21a/8b8abd3e1c0f08969d4c2a8f8fa4583c4357.pdf>

Morales, A. A., & Topón, E. D. (2016). *Ubicación y diseño de una obra de regulación de caudales sobre el río Quijos* (tesis pregrado). Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Ciencias de la Tierra y la Construcción, Sangolquí, Ecuador.

Montaner, M. E., & Sánchez-Almohalla, E. (1988). Aproximación por el método e Thornthwaite al cálculo de la infiltración de lluvia útil. Papeles de la geografía N° 14, págs. 223-235. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/105434.pdf>

ONU-Agua, Organización de las Naciones Unidas-Agua. (2005). *El agua, fuente de vida 2005-2015.* Recuperado de <http://www.un.org/waterforlifedecade/pdf/waterforlifebklt-s.pdf>

Rodríguez-Ortiz, C. (2016). *Análisis de la disponibilidad de agua verde a partir del ajuste de cálculo de la evapotranspiración en zonas de vegetación natural* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Medellín, Colombia.

Sager, R. L. (2000). Agua para bebida de bovinos. *INTA EEA San Luis, reedición de la Serie Técnica*, (126). Recuperado de [http://www.produccion-animal.com.ar/agua\\_bebida/67-agua\\_para\\_bebida\\_de\\_bovinos.pdf](http://www.produccion-animal.com.ar/agua_bebida/67-agua_para_bebida_de_bovinos.pdf)

Salmoral, G., Dumont, A., Aldaya, M., Rodríguez-Casado, R., Garrido, A., & Llamas, M. (2011). *Análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir*. Recuperado de <http://www.huellahidrica.org/Reports/Salmoral-et-al-2011.pdf>

Tólon, A., Lastra, X., & Fernández, V. (2013). Huella hídrica y sostenibilidad del uso de los recursos hídricos. Aplicación al Poniente Almeriense. Estudios previos y medidas de eficiencia. *M+A. Revista Electrónica de Medio Ambiente*, 14(1), 56-86. Recuperado de <https://www.ucm.es/cont/media/www/pag-41205/61articulo.pdf>

UNESCO, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2015). *Informe de las Naciones Unidas sobre los Recursos Hídricos en el Mundo 2015. 06134 Colombella*. Perugia, Italia: Oficina del Programa sobre Evaluación Mundial de los Recursos Hídricos, División de Ciencias del Agua. Recuperado de 2016, de <http://www.unesco.org/>

WFN, Water Footprint Network. (2011). *Manual para la evaluación de la huella hídrica*. Recuperado de <http://waterfootprint.org/media/ManualEvaluacionHH.pdf>