
ARTÍCULOS / ARTICLES

APROVECHAMIENTO DEL RECURSO AGUA Y HUELLA HÍDRICA (HH) A NIVEL DE CUENCA. CASO: CUENCA DEL RÍO TIRGUA, VENEZUELA

Joel Francisco Mejía

Universidad de Los Andes, Mérida - Venezuela
jmejia@ula.ve
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2632-1155>

Favian Vega Méndez

Universidad de Los Andes, Mérida - Venezuela
favianvega.m06@gmail.com
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5798-4026>

Seiad Man Eddin

Universidad de Los Andes, Mérida - Venezuela
seiadman.45@gmail.com
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6549-2929>

Recibido: 17/04/2020; Aceptado: 19/11/2021; Publicado: 04/07/2022.

Cómo citar este artículo/citation: Francisco Mejía, Joel; Vega Méndez, Fabian y Man Eddin, Seiad (2022). Aprovechamiento del recurso agua y Huella Hídrica (HH) a nivel de cuenca. Caso: Cuenca del Río Tirgua, Venezuela. *Estudios Geográficos*, 83 (292), e092. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.2022100.0100>

Resumen: Se evaluó la dinámica de aprovechamiento del agua a partir del enfoque de Huella Hídrica (HH) en la cuenca del río Tirgua mediante el modelo desarrollado por Hoekstra *et al.*, (2011), el cual permite cuantificar el impacto de las actividades antropogénicas sobre los recursos hídricos de un área geográfica delimitada. Se identificaron las actividades productivas predominantes en la cuenca, fueron compiladas las respectivas estadísticas geoproductivas del año 2008 y demográficas del año 2011 (proyectadas al 2015), debido a la ausencia de registros oficiales posteriores a esos años; se definieron los parámetros requeridos para estimar los componentes de agua verde, azul y gris, y la Huella Hídrica de la cuenca, a partir de las ecuaciones del modelo. La cuenca posee una HH total de 197.048.376 m³/año, que representa el 17,31% de la oferta total de recursos hídricos: 1138.423.803 m³ anuales, siendo el sector agrícola el que mayor impacto genera (67.903.251,79 m³/año), seguido del doméstico (66.858.233 m³/año), y el pecuario (61.542.998,38 m³/año). La HH gris representa el 50,93% de la HH total de la cuenca, destacando el papel del río Tirgua como vector receptor, asimilador y transportador de aguas residuales, evidenciando así la elevada presión que ejercen las actividades antropógenas sobre las cuencas hidrográficas en la región.

Palabras clave: Huella Hídrica Azul; Huella Hídrica Verde; Huella Hídrica Gris; recursos hídricos; cuenca de usos múltiples; río Tirgua.

USE OF WATER RESOURCES AND WATER FOOTPRINT (WF) AT THE CATCHMENT LEVEL. CASE: TIRGUA RIVER BASIN, VENEZUELA

Abstract: The dynamics of water use through the Water Footprint (WF) approach was evaluated in the Tirgua river basin using the model developed by Hoekstra *et al.*, (2011), which allows quantifying the impact of anthropogenic activities on the water resources of a defined geographical area. The predominant productive activities in the basin were identified and the respective geoproductive statistics for 2008 and demographic statistics for 2011 (projected to 2015) were compiled, due to the absence of official records after those years; the required parameters to estimate the green, blue and grey water components were defined, and the Water Footprint for the catchment was estimated, through the model equations. The Tirgua basin has a total WF of 197.048.376 m³/year, representing the 17,31% of the water supply: 1138.423.803 m³/year, being agriculture the activity with higher impact (67.903.251,79 m³/year), followed by domestic use (66.858.233 m³/year), and livestock (61.542.998,38 m³/year). Grey WF represent the 50,93% of the total WF in the catchment, highlighting the role of the Tirgua River as a vector for receiving, assimilating and transporting wastewater, demonstrating the high pressure exerted by anthropogenic activities on river basins in the region.

Keywords: Blue Water Footprint; Green Water Footprint; Grey Water Footprint; water resources; multiple use river basin; Tirgua river.

INTRODUCCIÓN

La **cuenca del río Tirgua** es uno de los sistemas hidrológicos más importantes de la región centro-norte de Venezuela, en la que se desarrollan importantes actividades agropecuarias e industriales que dinamizan la economía local y regional. Posee unas condiciones biofísicas particulares que se conjugan en una apreciable diversidad de recursos naturales: hídricos, hidrogeológicos, forestales y edáficos, además de una rica diversidad biológica representada por variadas formaciones vegetales y especies animales. La diversidad biofísica, y sobre todo, su dinámica de aprovechamiento, conllevó a que el Estado decretara en esta región tres figuras de protección (Áreas Bajo Régimen de Administración Especial - ABRAE), con la finalidad de controlar y regular la expansión territorial de actividades antropógenas: el Parque Nacional General Manuel Manrique o Tirgua, la Zona Protectora de la Cuenca alta del río Cojedes y la Zona Protectora del Macizo de Nirgua. No obstante, Paredes (2009) da cuenta de los notables cambios de uso y cobertura que persisten en la cuenca, y que presumiblemente estén afectando su productividad hídrica.

La creciente necesidad de evaluar, monitorear y gestionar los recursos hídricos del planeta de una forma más eficiente y productiva, ha devenido en el surgimiento de nuevos paradigmas y enfoques. Uno de los más recientes en este campo es el enfoque de la **Huella Hídrica - HH** (*Water Footprint*), el cual busca promover un uso eficiente, equitativo y sostenible del agua, representando un nuevo esquema para la planificación y manejo de los recursos hídricos (Zeng, Liu, Koeneman, Zárate y Hoekstra, 2012).

El enfoque fue presentado por Hoekstra y Hung (2002) e inicialmente se basaba en la estimación del contenido de agua oculta en cualquier bien o servicio consumido por un individuo o grupos de individuos en una entidad espacial específica (ciudad, país, continente). Sin embargo, el mismo ha ido evolucionando hasta convertirse en una herramienta complementaria a las convencionales para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) a nivel de cuencas (Zárate, Fernández y Kuiper, 2017, p. 7). La publicación de la Metodología Estándar de Cálculo de Huella Hídrica y el Manual de Evaluación de Huella Hídrica (Hoekstra, Chapagain, Aldaya y Mekonnen, 2011) han incrementado el volumen de producción y estandarización del índice a nivel global (Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia [CCTA], 2013a).

La Huella Hídrica (HH) puede definirse como: “un indicador que permite identificar las relaciones so-

cioambientales respecto al agua y su consumo, y está orientado especialmente hacia las actividades socioeconómicas, razón por la cual se presenta como el más importante factor de presión e impacto sobre los recursos naturales” (Arévalo, 2012, p. 9).

Conviene destacar que la HH puede ser estudiada según distintas perspectivas cuando se trata de una determinada área geográfica (región, estado, cuenca), bien sea para estimar la HH del consumo de la población de una zona específica, la HH sobre los recursos hídricos de cualquier entidad territorial o incluso el estudio de las importaciones y exportaciones de agua virtual (Hoekstra *et al.*, 2011, p. 12 - 13). La HH puede ser aplicada para determinar el volumen de agua utilizado de forma directa o indirecta para la producción de cualquier bien o servicio, sumando los consumos de todas las etapas de la cadena productiva, o bien, para determinar el volumen total de agua necesaria para generar los bienes y servicios producidos, consumidos y/o exportados por un individuo, empresa o región geográfica delimitada, como un país o una cuenca hidrográfica.

Las primeras estimaciones de Huella Hídrica a nivel de cuenca fueron hechas en España (Aldaya y Llamas, 2008; Aldaya, Martínez-Santos y Llamas, 2010; García, 2013; Dumont, Salmoral y Llamas, 2013; Tolón, Bolívar y Fernández, 2013; Pellicer, 2014). También en ese país, el enfoque ha sido utilizado para estudiar la relación entre demanda/uso de agua a distintos niveles político-administrativos (Sotelo, Olcina, García y Sotelo, 2012; Sotelo, 2016), y a nivel de ciudades (Sotelo y Sotelo, 2018). Han sido además efectuadas evaluaciones en China (Zhao, Yang, Yang, Chen y Qin, 2010; Zeng *et al.*, 2012; Dong *et al.*, 2013), y en Inglaterra (Zhang, Mathews, Frapporti y Mekonnen, 2014). En nuestro continente, el enfoque solo ha sido aplicado en Colombia para estimar la HH de la cuenca del río Porce (CCTA, 2013a) (Builes, 2013), y en una evaluación de recursos hídricos por cuenca a nivel nacional (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia [IDEAM], 2015). Sotelo (2015) realizó un análisis comparativo entre la huella hídrica de España y la de los países latinoamericanos.

En tal sentido, el presente trabajo tuvo como objetivo realizar una estimación de la Huella Hídrica total de la cuenca del río Tirgua, a través de la derivación de sus principales componentes: Huella Hídrica verde (HHv), Huella Hídrica azul (HHa) y Huella Hídrica gris (HHg) para las principales actividades productivas de la cuenca, siguiendo el modelo desarrollado por Hoekstra *et al.*, (2011).

FUENTES Y METODOLOGÍA

1. Área de estudio

El área de estudio seleccionada para la investigación fue la cuenca del río Tirgua, el cual nace en las estribaciones del Tramo Occidental del Sistema de la Costa, en la región centro occidental de Venezuela y se ubica entre las coordenadas: 4°48'47,42" y 5°17'47,88" N; y 63°17'0,87" y 63°54'27,80" E. Abarca parte de los estados Carabobo, Cojedes y Yaracuy, y ocupa una superficie aproximada de 1497,3 km² (Fig. 1).

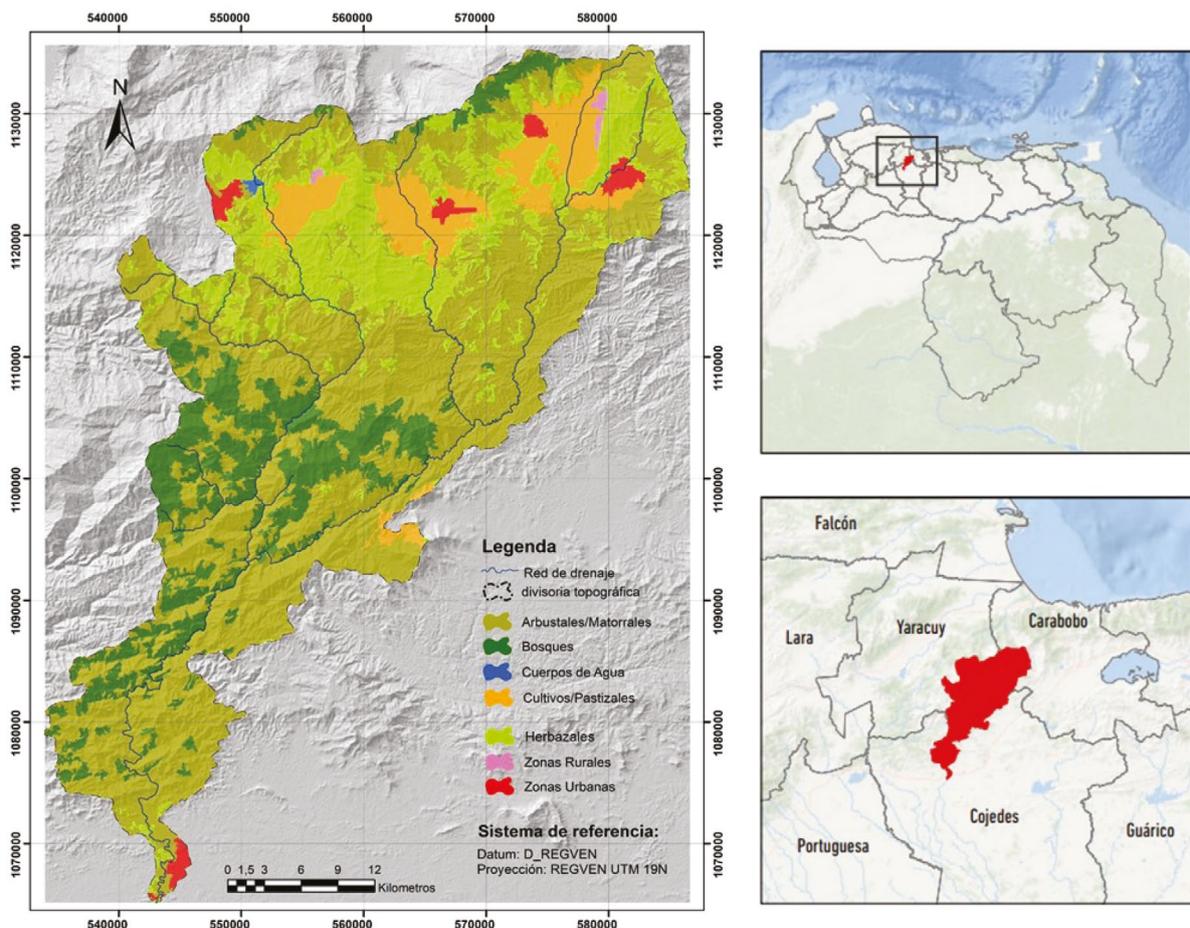
Fisiográficamente se identifican tres zonas: al norte domina un paisaje de colinas y amplios valles de montaña, con pendiente entre 20% y 60%, en los cuales se asientan algunos centros urbanos importantes como: Nirgua, Bejuma, Montalbán y Miranda. Hacia el centro el relieve es predominantemente accidenta-

do y abrupto (pendiente $\geq 40\%$), mientras que al sur dominan los paisajes de colinas bajas redondeadas y planicies intermedias, con pendiente entre 16% y 35% (Paredes, 2009).

Las temperaturas medias anuales varían entre los 18 °C (sobre los 1400 msnm), a más de 24 °C en la parte baja. Las precipitaciones varían entre 700 mm/año hacia el norte y 1700 mm/año hacia la parte central de la cuenca. El período de lluvia va de mayo a octubre con un pico máximo de precipitación en julio, alternando con un período seco durante el resto del año (Gobernación del Estado Cojedes *et al.*, 2011).

Al norte de la cuenca los usos de la tierra son principalmente agropecuarios, industriales y urbanos, con predominancia de coberturas herbáceas; en la parte central dominan formaciones vegetales boscosas moderadamente intervenidas bajo la protección de dos figuras:

FIGURA 1
LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA CUENCA DEL RÍO TIRGUA



Fuente: Elaboración propia.

Parque Nacional Tirgua y Zona Protectora de la cuenca alta del río Cojedes; en la parte sur predominan arbustales y matorrales junto con amplias zonas dedicadas a la ganadería, y se localiza la ciudad de San Carlos.

2. Compilación de estadísticas

Las estadísticas hidroclimáticas, en particular los datos climatológicos, así como los registros hidrométricos del río Tirgua en la estación Paso Viboral ubicada en el punto de cierre de la cuenca, fueron obtenidos del Instituto Nacional de Tierras (INTI) y del Ministerio de Ecosocialismo y Aguas (MINEA). **Las estadísticas demográficas** referidas a la población (distribución y estructura), fueron tomadas de los Censos Nacionales de Población y Vivienda de Venezuela: XII (Oficina Central de Estadística e Información [OCEI], 1990), XIII (Instituto Nacional de Estadística [INE], 2001) y XIV (INE, 2011d). **Las estadísticas geo-productivas**, específicamente los datos sobre producción agropecuaria fueron obtenidos del VII Censo Agrícola de Venezuela (Ministerio del Poder Popular para la Agricultura y Tierras [MPPAT], 2008), mientras que los datos de producción industrial fueron extraídos de Bellorín (2008), del INE (2011a,b,c) y del Registro de Actividades Capaces de Degradar el Ambiente de la Dirección Regional de Ecosocialismo y Aguas del estado Cojedes (MINEA, 2015).

La información referente a consumo de agua en actividades industriales y agropecuarias, uso de fertilizantes y otras variables fue obtenida de diversas fuentes, previo a un exhaustivo proceso de búsqueda e investigación documental, debido a que en Venezuela no se llevan registros oficiales sobre la mayoría de estos parámetros.

3. La Huella Hídrica (HH) y su estimación

De acuerdo con Hoekstra *et al.*, (2011, pp. 28, 29) la HH es un indicador multidimensional compuesto por tres componentes esenciales:

HH Azul (HHa): se refiere al consumo de los recursos hídricos azules (agua dulce), superficial o subterránea, en toda la cadena de producción de un producto. El consumo se refiere a la pérdida de agua disponible en el área de la cuenca. La pérdida ocurre cuando el agua se evapora, no regresa a la misma cuenca, es dispuesta al mar o se incorpora a un producto agropecuario o manufacturado.

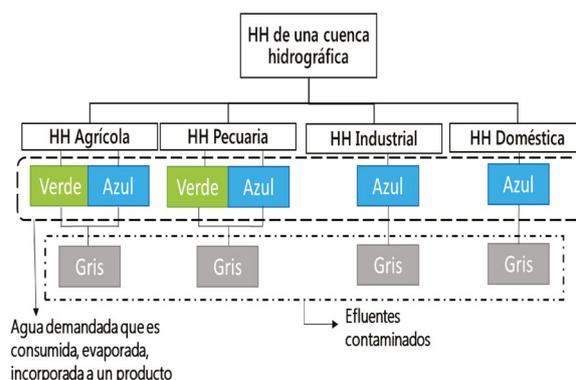
HH Verde (HHv): se refiere al consumo de recursos de agua verde (agua de lluvia que no se convierte en escorrentía, sino que se incorpora fisiológicamente en los productos agropecuarios).

HH Gris (HHg): está definida como el volumen de agua dulce que se requiere para transportar y asimilar una carga de contaminantes, dadas las concentraciones naturales y estándares ambientales de calidad de agua.

El Río Tirgua conforma una cuenca de usos múltiples, dada la diversidad de actividades antropógenas que allí se desarrollan (Man y Vega, 2017, p. 17); por ello, la estimación de su Huella Hídrica implicó considerar los principales conjuntos de usos productivos de ese sistema hídrico: agrícola, pecuario, industrial y uso urbano (doméstico). La Figura 2 muestra como fueron estructuralmente dispuestos los tres componentes de HH en su estimación para los principales usos en esta cuenca.

Es importante señalar que la HH como indicador debe tener una delimitación temporal específica, dada la dinámica cambiante de las actividades productivas y demográficas en el territorio. Para efectos de este trabajo, y dado que en Venezuela los procesos de actualización de estadísticas se han visto interrumpidos en los últimos años, **la HH fue estimada considerando la data geo-productiva del año 2008, y los datos demográficos del último Censo Nacional del 2011, utilizando proyecciones de crecimiento poblacional para el año 2015.**

FIGURA 2
HUELLA HÍDRICA DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA. SE SEÑALAN LOS SECTORES Y COMPONENTES ANALIZADOS EN EL CASO DE LA CUENCA DEL RÍO TIRGUA.



Fuente: Elaboración propia.

Matemáticamente, la Huella Hídrica de un área o ámbito geográfico delimitado se asume como la sumatoria de la huella hídrica de todos los procesos productivos que ocurren dentro de sus límites, y se expresa a través de la Ecuación 1:

$$HH_{AREA} = \sum HH_{PROCESOS} \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde:

HH_{AREA} = Huella Hídrica de un área geográfica delimitada ($m^3/año$).

$HH_{PROCESOS}$ = Sumatoria de las Huellas Hídricas de cada uno de los procesos o actividades socioeconómicas consideradas en el área de estudio ($m^3/año$).

3.1. Huella Hídrica Agrícola (HHA):

De acuerdo con la Figura 2, la HHA está compuesta por las Huellas Hídricas verde, azul y gris. Para la estimación de los requerimientos de agua verde y azul del sector agrícola se parte del entendimiento de los fenómenos físicos y químicos involucrados en el comportamiento vital de una especie vegetal: nacimiento, crecimiento, desarrollo, producción y muerte, incluyendo además aquellas variables biofísicas que determinan el comportamiento del entorno: clima, precipitación, suelo (CCTA, 2013b; Ruíz *et al.*, 2013).

Huella Hídrica Agrícola verde (HHA_v): está referida a la precipitación efectiva y corresponde al agua de precipitación que es aprovechada por el cultivo. Se calculó haciendo uso de las ecuaciones 2 y 3:

$$HHA_{verde} = \frac{CWU_{verde}}{Y} \quad [\text{Ec. 2}]$$

$$HH_{verdeTotal} = HH_{verde} * prod. anual \quad [\text{Ec. 3}]$$

Donde:

CWU_{verde} = agua verde (de precipitación) utilizada por cada tipo de cultivo al año (m^3/ha).

Y= Rendimiento del cultivo (t/ha).

Prod. Anual= producción total anual de cada tipo de cultivo (t).

Para ello fueron identificados y tipificados a partir del último Censo Agrícola reciente (MPPAT, 2008) los principales cultivos en la cuenca, su correspondiente rendimiento y su productividad anual (Tabla 1). Los requerimientos hídricos de cada cultivo fueron estimados a partir de: Sánchez *et al.*, (2004); Allen, Pereira, Raes y Smith, (2006); Romero, Rodríguez, Rázuri, Suniaga y Montilla, (2009); y Ruíz *et al.*, (2013).

Huella Hídrica Agrícola azul (HHA_a): se corresponde con el volumen de agua incorporada por irrigación a los cultivos, y se calculó de forma análoga a la HHA_v

a partir de las ecuaciones 2 y 3 (CCTA, 2013b) (Hoekstra *et al.*, 2011). La cantidad de agua de riego para cada cultivo se determinó a partir de: Sánchez *et al.*, (2004); Allen *et al.*, (2006); Romero *et al.*, (2009); y Ruíz *et al.*, (2013).

Huella Hídrica Agrícola gris (HHA_g): se corresponde con los volúmenes de agua que han sido contaminados durante todo el proceso (de la siembra a la cosecha), principalmente por uso de fertilizantes y pesticidas. Para Venezuela la información sobre uso pesticidas es muy escasa, por lo que este componente pudo calcularse solo considerando el uso de fertilizantes, a través de la Ecuación 4:

$$HH_{gris\ cultivo} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} \quad [\text{Ec. 4}]$$

Donde:

L= cantidad de fertilizante aplicado al cultivo (kg/ha).

C_{max} = concentración máxima permisible del N y/o P en el agua (kg/m^3).

C_{nat} = concentración natural del N y/o P en el agua (kg/m^3).

Los datos sobre fertilizantes utilizados en cada cultivo fueron obtenidos a partir de: Guerrero (1998); Morros (2001); Martínez, Leonte, Castellano e Higuera, (2003); López, Beltrán, Ramos y López, (2009); Ruíz *et al.*, (2013); Martínez (2015); y FAO (2016).

TABLA 1
PRINCIPALES CULTIVOS REPORTADOS EN LA CUENCA DEL RÍO TIRGUA

Tipo de cultivo	Cultivo representativo	Superficie cultivada (ha)	Producción anual (t)	Rendimiento (t/ha)
Tropicales - cereales	Cacao	12,27	3,32	2,50
	Café	1787,84	1105,15	3,56
	Tabaco	66,00	120,25	3,00
	Maíz	1154,06	2971,63	21,09
	Sorgo	62,10	97,81	7,53
Frutales	Aguacate	215,73	1798,17	76,04
	Lechosa	10,24	110,08	79,46
	Mandarina	370,74	3163,94	56,24
	Naranja	3882,53	55286,59	134,07
Hortalizas	Ají	244,03	927,36	39,60
Leguminosas	Caraota	356,42	315,09	6,93
Tubérculos	Ñame	780,44	6527,55	79,75
Total	12 cultivos	8942,4	72426,94	509,77

Fuente: MPPAT (2008). Elaboración propia.

3.2. Huella Hídrica Pecuaria (HHP):

Para el cálculo de la HHP se tuvieron en cuenta los subsectores: Equinos, bovinos, bufalinos, ovinos, caprinos y aves presentes en la cuenca, cuyos datos fueron extraídos del censo agrícola (MPPAT, 2008) (Tabla 2). La HHP está dada por la Ecuación 5:

$$HH_{Pecuaria} = HH_{alimento} + HH_{consumo} + HH_{servidumbre} \quad [\text{Ec. 5}]$$

La **Huella Hídrica del alimento** corresponde a la Huella Hídrica verde de los pastos que consumen principalmente los bovinos, bufalinos y equinos, y se calculó de forma análoga a la HHA_v (Ecuación 3); los requerimientos de agua de los pastos y su rendimiento por hectárea fueron determinados a partir de Murillo *et al.*, (2014). La **Huella Hídrica del consumo** se refiere al volumen de agua que consumen los animales para su funcionamiento fisiológico, y se calculó a partir del producto del consumo promedio de agua diario de cada tipo de ganado, y el número de cabezas de ganado correspondiente.

TABLA 2
ESTADÍSTICAS SOBRE LA ACTIVIDAD GANADERA EN LA CUENCA DEL RÍO TIRGUA

Ganado	Nº Cabezas	Superficie ocupada por pastos (ha)	
Bovino	25306	Naturales	28380
Bufalino	320	Cultivados	9801
Caprino	468	Total	38181
Ovino	1365		
Porcino	87570		
Equino	393		
Aves	5915635		

Fuente: MPPAT (2008). Elaboración propia.

Para ello fueron usados valores referenciales obtenidos de: Godoy, Muñoz, Quijada, D' Aubeterre y Gómez, (2001); Muñoz (2006); Mendes (2011); IDEAM (2015). La **Huella Hídrica de servidumbre** se refiere al agua utilizada en el aseo de establos, porquerizas, galpones, entre otros, siendo estimada en función de los datos reportados en IDEAM (2015).

Huella Hídrica Pecuaria gris (HHPg): La información para calcular la contaminación del agua por las actividades pecuarias es bastante limitada en Venezuela, por lo que fue necesario recurrir a informa-

ción secundaria de países vecinos con condiciones biofísicas similares, así como a métodos indirectos de estimación de contaminación por esta actividad productiva. La HHPg se calculó utilizando la Ecuación 4, empleando valores referenciales derivados de CCTA (2013b).

3.3. Huella Hídrica Industrial (HHI):

Para la HHI de la cuenca fueron consideradas las empresas inscritas en el Registro de Actividades Capaces de Degradar el Ambiente de la Dirección Regional de Ecosocialismo y Aguas del estado Cojedes (MINEA, 2015). Se incluyeron las industrias de la ciudad de Tinaco (fuera de la cuenca), ya que usan los recursos hídricos provenientes del río Tirgua para su producción. La información de las industrias de las parroquias de los estados Carabobo y Yaracuy fue obtenida a partir de Bellorín (2008), e INE (2011a,c).

Huella Hídrica Industrial azul (HHI_a): está relacionada con aquellos volúmenes de agua que son empleados por cada tipo de industria que se evaporan o son incorporados a un producto y que por lo tanto no retornan a la cuenca, siendo estimada a partir de las Ecuaciones 6 y 7:

$$HH_{azul} = \frac{IWU_{azul}}{p} * n \quad [\text{Ec. 6}]$$

$$HH_{azulTotal} = HH_{azul} * p \quad [\text{Ec. 7}]$$

Donde:

IWU_{azul}= agua azul utilizada por cada tipo de industria (m³)

n= número de establecimientos por cada tipo de industria

p= producción anual promedio de cada tipo de industria (t/año)

Huella Hídrica Industrial gris (HHI_g): está relacionada con aquellos volúmenes de agua que son vertidos por cada tipo de industria y que retornan contaminados a la cuenca, y se estima de forma análoga a la HHI_a, a partir de las Ecuaciones 6 y 7.

La Tabla 3 contiene el inventario de los principales establecimientos industriales considerados para la estimación de la HHI. La parametrización de los valores referenciales necesarios para la estimación

de la HHIa y HHIg fueron derivados de: Ramírez, Patel y Blok, (2006); Chapagain y Hoekstra (2007); Kenny *et al.*, (2009); Beverage Industry Environmental Roundtable [BIER], (2011); Fultobn, Cooley y Gleick, (2012); e Instituto Nacional de Estadística de España (2013).

3.4. Huella Hídrica Doméstica (HHD):

Para la estimación de la Huella Hídrica Doméstica se consideró el volumen promedio de agua consumido por una persona diariamente, en relación al tamaño poblacional de los habitantes que hacen uso del agua generada en la cuenca. A pesar de ser un procedimiento con alto grado de generalización, da una idea bastante precisa de la cantidad de agua que es consumida en el sector doméstico. Para ello se emplearon las Ecuaciones 8, 9 y 10, adaptadas a partir de Hoekstra *et al.* (2011):

$$HHD_{\text{Doméstica}} = V_{Ag} * p \quad [\text{Ec. 8}]$$

Donde:

V_{Ag} = Volumen de agua consumido ($\text{m}^3/\text{habitante}$).

p = Tamaño de la población que hace uso del recurso hídrico (miles de habitantes).

TABLA 3
NÚMERO DE ESTABLECIMIENTOS INDUSTRIALES DE LA CUENCA DEL RÍO TIRGUA

Tipos de empresas (Clasificación Industrial CIU para Venezuela)	Código	Número de Empresas	Producción Promedio (ton/año)
Alimentos/Agroindustria	Al/Ag	261	106062,00
Bebidas y Tabaco	Bd/Tc	5	50832,00
Textil	Tex	2	8,25
De cuero y asociados	C/as	7	9,50
Maderera	Mad	13	31,44
Química	Quim	16	200,00
Del plástico/caucho	Pl/Cc	9	113,88
De minerales no metálicos	MnoMt	9	27,76
Del metal	Mtg	6	25000,00
De productos elaborados del metal	Em	4	15000,00
De manufactura de maquinaria	Maq	1	8000,00
De fabricación de equipos y componentes eléctricos	Ece	1	18,01
Otras	Ot	5	85,00
Total		339	205387,84

Fuente: Bellorín (2008); MINEA (2015). Elaboración propia.

La **Huella Hídrica Doméstica azul (HHDa)** está referida al agua que es utilizada y que se evapora o infiltra; por su parte, la **Huella Hídrica Doméstica gris (HHDg)** se relaciona con los volúmenes de aguas residuales o que son contaminados por el sector doméstico e implica que no sea recomendable su reutilización, principalmente porque en toda la cuenca sólo se reporta una planta de tratamiento de aguas de origen doméstico en la ciudad de Bejuma (Paredes, 2009). Considerando esto, algunos estudios realizados en Venezuela y en otras regiones del mundo ofrecen cifras porcentuales de cuál es el uso que se da al agua consumida en el sector doméstico, y en base a ellos se determinaron los

TABLA 4
PRINCIPALES CENTROS POBLADOS POR PARROQUIA QUE HACEN USO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS GENERADOS EN LA CUENCA DEL RÍO TIRGUA (EN **NEGRITA** LA CAPITAL DE CADA PARROQUIA). (VALORES PROYECTADOS PARA EL AÑO 2015)

Centros Poblados	Parroquia	Número de habitantes	Estado
Bejuma	Bejuma	36901	
Altos de Reyes			
Miranda	Miranda	34052	Carabobo
El Carmen			
Santa Rosa			
Montalbán	Montalbán	29098	
Aguirre			
Mocundo			
Nirgua	Nirgua	51112	Yaracuy
Guayabal			
Jiraquito			
Salom	Salom	13595	
Corumbo			
La Nasa			
San Carlos	San Carlos de Austria	119477	
Maraquita			
La Sierra	Juan Ángel Bravo	1255	
Manrique	Manuel Manrique	4875	Cojedes
Tierra Caliente			
Las Turcas			
Macapo	Macapo	6356	
Santa Rosa			
Tinaco	Tinaco	37911	
Tinaquillo	Tinaquillo	116096	
Los Aguacates			

Fuente: INE (2011 a; b; c; d). Elaboración propia.

volúmenes de HHDa y HHDg a partir de las ecuaciones 9 y 10:

$$tyHH_{azul} = HH_{doméstica} * 17,5\% \quad [\text{Ec. 9}]$$

Donde:

$HH_{doméstica}$ = Volumen de agua total consumido por la población ($m^3/\text{habitante}$).

17,5% = Porcentaje asumido de consumo de agua azul.

La HHDg fue estimada de forma análoga:

$$HH_{gris} = HH_{doméstica} * 82,5\% \quad [\text{Ec. 10}]$$

82,5% = Porcentaje asumido de agua gris.

La Tabla 4 contiene las estadísticas demográficas compiladas para la estimación de la HHD en la cuenca. En este caso, se trata de valores de proyecciones de población para el año 2015. Los valores requeridos para la parametrización de las ecuaciones respectivas, fueron tomados de: Thompson *et al.*, (2001); Rázuri, Rosales, Juárez, Hernández y Romero, (2008); Blanco, Lara, Velezmoro y Aguilar, (2014); y Domene (2014).

3.5. Huella Hídrica del Embalse Cabuy

La Huella Hídrica del Embalse Cabuy se basó en la relación entre la capacidad de los embalses y la diná-

mica de la evaporación, lo cual afecta su capacidad de almacenamiento. En este caso, las estimaciones evaporimétricas se basaron en el método empleado por Hardy y Garrido (2010).

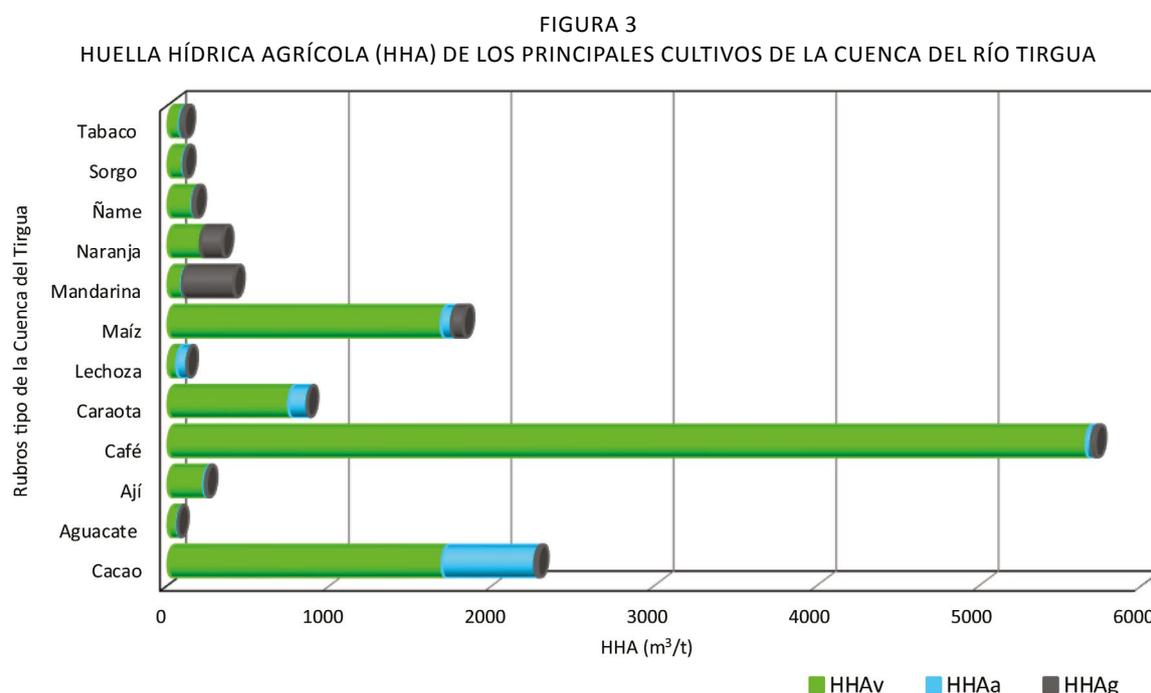
Hechas las estimaciones de las huellas parciales de cada actividad productiva, se procedió a la estimación de la huella por sector económico, para luego realizar la estimación total a través de la Ecuación 1.

RESULTADOS

1. Huella Hídrica Agrícola (HHA)

La Figura 3 muestra los resultados de Huella Hídrica Agrícola (HHA) en sus tres componentes para los principales cultivos tipo en la cuenca. El café junto a la caraota, maíz, mandarina, naranja y ñame, engloban el 80% de la producción total de la cuenca del Tirgua. Tres cultivos muestran una Huella Hídrica Agrícola verde (HHA_v) mayor a 1000 m^3/t : café, maíz y cacao; cuatro cultivos: caraota, ají, naranja y ñame, ostentan una HHA_v entre 100 y 1000 m^3/t ; para los cinco rubros restantes: sorgo, tabaco, mandarina, aguacate y lechosa, la HHA_v oscila entre 10 y 100 m^3/t producida al año (Fig. 3).

Por su parte, los valores de Huella Hídrica Agrícola azul (HHA_a), indican que los cultivos de cacao y carao-



Fuente: Elaboración propia. (HHA_v: Huella Hídrica Agrícola verde; HHA_a: Huella Hídrica Agrícola azul; HHA_g: Huella Hídrica Agrícola gris).

ta en la cuenca requieren importantes cantidades de agua azul (>100 m³/t) para sostener su producción; le siguen el maíz, la lechosa y el café con HHAa entre 10 y 100 m³/t; finalmente, aparece el resto de los cultivos: ají, tabaco, sorgo, aguacate, naranja, con HHAa inferiores a 6 m³/t.

De los 12 cultivos que más agua demandan en la cuenca (Fig. 3), seis constituyen cultivos permanentes: cacao, aguacate, café, lechosa, mandarina y naranja, por lo que dicha demanda es constante a lo largo del año, factor que supone una presión permanente sobre los recursos hídricos y que puede condicionar el rendimiento de los mismos durante periodos secos extendidos. La condición permanente de estos cultivos sugiere que su superficie probablemente se haya mantenido con poca variación a lo largo de estos años, y con ello su dinámica hídrica.

En cuanto a la Huella Hídrica Agrícola gris (HHA_g), se observa que la mandarina y la naranja son los cultivos con mayor HHA_g, al superar los 100 m³/t (Fig. 3); le siguen el cacao, café, ñame y tabaco (HHA_g entre 10 y 100 m³/t), mientras que el resto de los cultivos emiten menos de 10 m³/t de agua gris (Figura 3). No obstante, y como ya se mencionó antes, la estimación de este componente solo incluyó los datos de fertilización, por lo que estos resultados seguramente están subestimados.

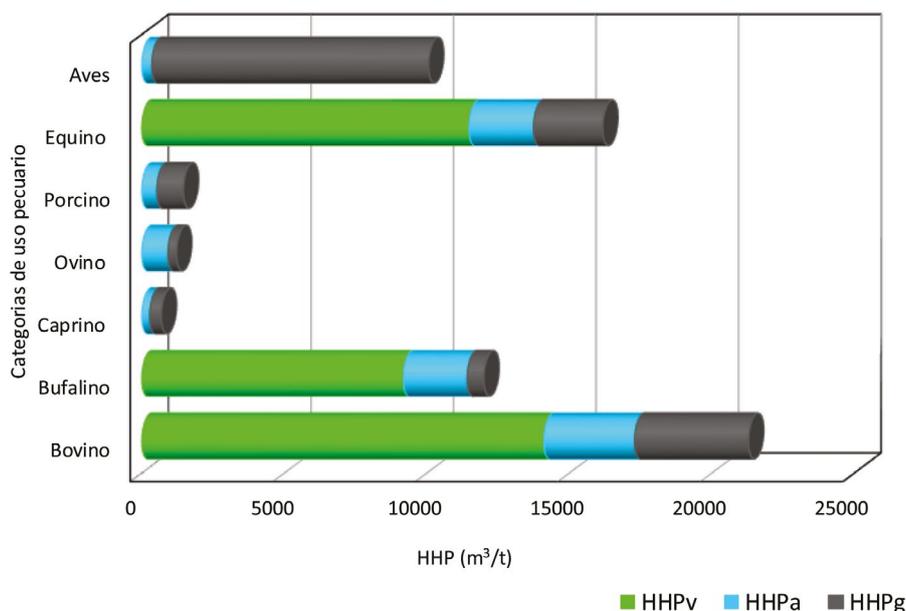
La contaminación difusa asociada a la HHA_g es un elemento crucial a considerar en la cuenca, puesto que la mayor parte de la superficie bajo uso agrícola o pecuario se encuentra concentrada en la parte alta, en las subcuencas de cabecera (como se observa en la Figura 1). Dichos efluentes son acumulados y transportados por el río Tirgua aguas abajo, comprometiéndose la calidad del agua en las partes media y baja. En general, los resultados son altamente concordantes con los obtenidos en la cuenca del río Porce en Colombia (CCTA, 2013a).

2. Huella Hídrica Pecuaria

La Figura 4 muestra los resultados de la Huella Hídrica Pecuaria (HHP) para la cuenca del río Tirgua, en sus componentes verde (HHP_v), azul (HHP_a) y gris (HHP_g). Destaca el alto valor de HHP_v asociado al consumo de pastos por parte de Bovinos, Bufalinos y Equinos (>1000 m³/t); los ovinos y porcinos tienen un consumo entre 500 y 1000 m³/t. Por el contrario, el consumo de agua verde por parte de las Aves, Caprinos y Ovinos es comparativamente bajo (< 500 m³/t) (Fig. 4).

Los valores de HHP_g reflejan la importante cantidad de efluentes asociados al mantenimiento y limpieza de establecimientos destinados a la producción avícola, los cuales deben ser efectuados con bastante regularidad y emplean grandes cantidades de agua, ya que este

FIGURA 4
HUELLA HÍDRICA PECUARIA (HHP) EN LA CUENCA DEL RÍO TIRGUA



Fuente: Elaboración propia. (HHP_v: Huella Hídrica Pecuaria verde; HHP_a: Huella Hídrica Pecuaria azul; HHP_g: Huella Hídrica Pecuaria gris).

tipo de animales es altamente sensible a condiciones de poca higiene (El Sitio Avícola, 2016). Los desechos fisiológicos de la ganadería Bovina y Equina contienen altos contenidos de Nitrógeno y Fósforo, elementos que pueden alterar la calidad del agua, por lo que este aporte es importante dentro de la HHPg (CCTA, 2013b).

La ganadería bovina es la que mayor impacto tiene sobre las fuentes de agua verde y azul, siendo además la actividad ganadera dominante de la cuenca del río Tigua, seguida de la avícola que por su parte emite la mayor cantidad de efluentes contaminados (agua gris); en tercer lugar, se ubica el ganado porcino, el cual cuenta con importantes niveles de HHPa y HHPg. El resto de tipologías tiene menor significancia debido a que tienen una menor presencia en la cuenca. Estos resultados fueron altamente concordantes con los obtenidos en la cuenca del río Porce - Colombia (CCTA, 2013a).

3. Huella Hídrica Industrial

Llama la atención el bajo valor del componente azul de HHI de cada tipo de industria comparado con el gris (Fig. 5 a y b), debido principalmente a que el primero se asocia a las cantidades de agua que se evaporan, se pierden o se incorporan a los productos durante el proceso industrial y que varía notablemente de acuerdo al tipo de manufactura. El mayor valor en este caso lo tiene la industria química (Fig. 5a), pues en esta se emplea el agua para el acabado de diversos productos como: pinturas, barnices, jabones, detergentes, y productos de limpieza, tintas, entre otros (Mager y McCann, 2012); dicha agua se incorpora a los productos y por tanto, se contabiliza dentro del componente HHlg.

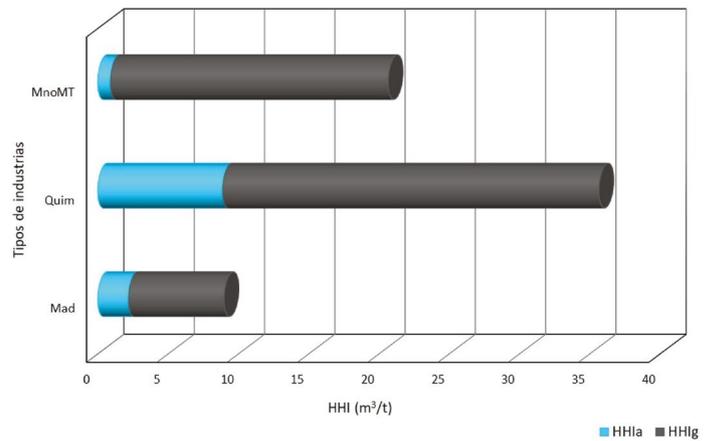
El procesamiento industrial de minerales no metálicos también presenta una elevada HHI, debido principalmente a la producción de cemento, picado y tallado de piedras para el sector de la construcción y fabricación de yeso y otros productos asociados, cuyos residuos (principalmente micro partículas) son difíciles de controlar y limpiar, empleando grandes cantidades de agua que terminan asimilando dichos residuos y siendo en consecuencia contaminada.

La tipología de industrias predominante en la cuenca es la asociada a la agroindustria, con más de 261 empresas (77% del total de industrias consideradas en este trabajo), seguida de las industrias químicas con 16 empresas (5% del total), y en tercer lugar las madereras con 13 empresas (4%); el 14% restante agrupa al resto de establecimientos industriales analizados. Considerando el peso que tiene la agroindustria dentro de la cuenca en cuanto a distribución espacial,

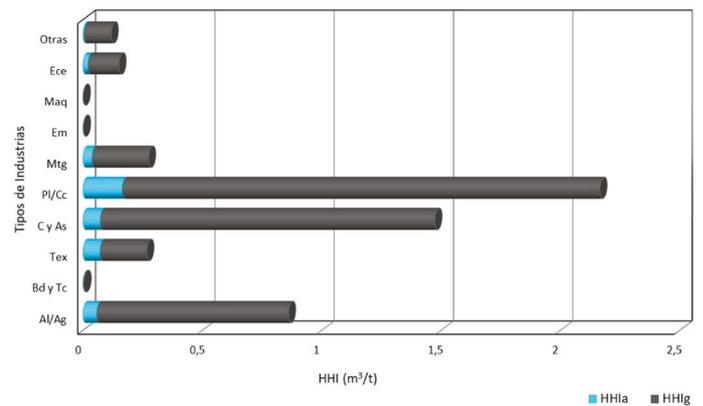
número de empresas, su producción promedio y sus valores de HHlg, es este el tipo de industria que tiene un mayor impacto sobre los recursos hídricos de la cuenca del río Tigua, en especial en aquellas subcuencas que albergan o abastecen zonas industriales.

Los efluentes provenientes de las industrias de alimentos, bebidas, tabaco, químicos y madera que predominan en la parte alta de la cuenca, ubicadas en Bejuma, Miranda, Montalbán y Nirgua, suelen tener elevadas concentraciones de DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno), nitrógeno, fósforo, aceites, grasas y fenoles que gradualmente migran al río Tigua a través de las aguas subterráneas y/o por escurrimiento superficial (Paredes, 2009).

FIGURA 5
 HUELLA HÍDRICA DEL SECTOR INDUSTRIAL (HHI) DE LA CUENCA DEL RÍO TIRGUA



(a)



(b)

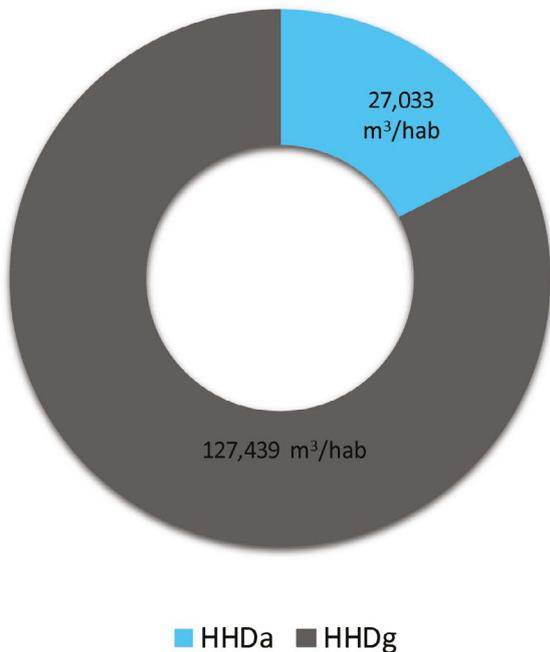
Fuente: Elaboración propia. (HHla: Huella Hídrica Industrial azul; HHlg: Huella Hídrica Industrial gris).

4. Huella Hídrica Doméstica

De acuerdo con los resultados obtenidos, una persona consume anualmente unos 154 m³ de agua en su hogar y que es extraída de la cuenca, de los cuales más del 80% pasa a conformar el componente gris de la HHD, lo que indica que gran parte del agua que las personas utilizan en sus hogares termina contaminada y vertida (Fig. 6). Dicha tendencia fue igualmente descrita en la cuenca del río Porce (CCTA, 2013a), indicando que los volúmenes de agua contaminada proveniente de los hogares tienen el mayor peso dentro de la cuantificación de la HHD.

En teoría, cada habitante de la cuenca del río Tirgua utiliza diariamente 423 litros de agua potable para satisfacer sus necesidades, valor que duplica el promedio de consumo estimado para América Latina (200 litros/persona/día), pero resulta muy similar al valor promedio estimado para Venezuela por González (2000): 424 litros/persona/día. Este nivel de consumo per cápita diario responde a una serie de factores como las condiciones climáticas propias de la región centro occidental del país (altas temperaturas, marcada estacionalidad de las lluvias), por lo que las

FIGURA 6
HUELLA HÍDRICA DOMÉSTICA (HHD) ACUMULADA (AZUL Y GRIS) DE LA CUENCA DEL RÍO TIRGUA



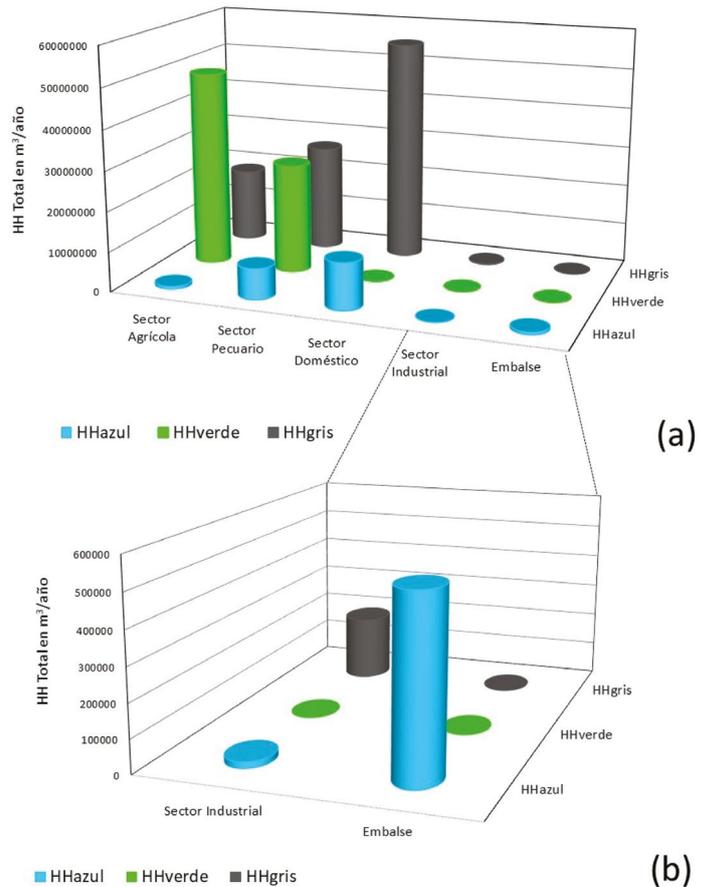
Fuente: Elaboración propia. (HHDa: Huella Hídrica Doméstica azul; HHDg: Huella Hídrica Doméstica gris), en m³/habitante.

personas ingieren mayores cantidades de agua que compensen las pérdidas por transpiración (Man y Vega, 2017).

5. Huella Hídrica Total de la Cuenca del río Tirgua

La Figura 7(a) y (b) muestra los valores totales de Huella Hídrica por sector productivo para la cuenca del río Tirgua. El sector agrícola muestra una importante Huella Hídrica verde (HHAv), que alcanza los 48.754.632,54 m³/año, mientras que la HHAg es de 18.480.056,7 m³/año. En el sector pecuario, por su parte, los valores de HHPv y HHPg resultaron bastante similares (27.291.073,43 y 26.532.591,33 m³/año, respectivamente) (Fig. 7(a)). En el sector doméstico destaca el alto valor de Huella Hídrica gris obtenido (HHDg), el cual alcanza los 55.158.042,63 m³/año. Ello da cuenta del papel funcional que cumple el río Tirgua, como vector receptor, asimilador y

FIGURA 7
HUELLA HÍDRICA TOTAL POR SECTOR PRODUCTIVO PARA LA CUENCA DEL RÍO TIRGUA



Fuente: elaboración propia.

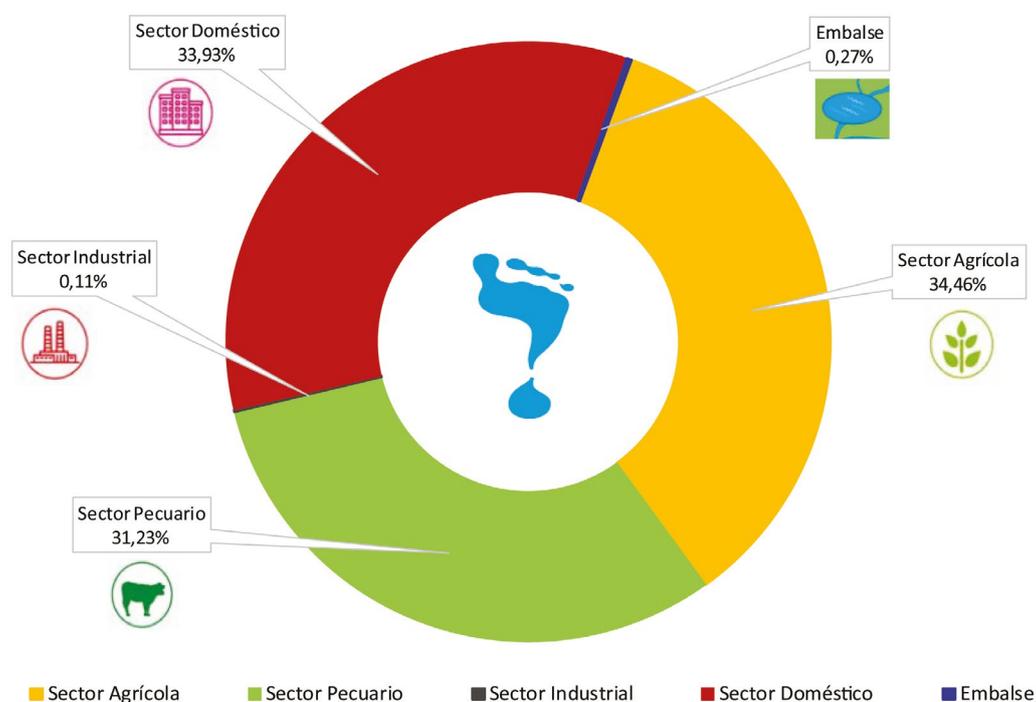
transportador de aguas residuales que proceden de las viviendas, además de los otros usos considerados. En el caso del sector industrial, los valores de HH_{Ia} y HH_{Ig} resultaron significativamente bajos en comparación al resto de los sectores, lo cual puede deberse a los modestos niveles de producción registrados por las industrias de la zona y a las deficiencias en la data disponible, pues la HH_{Ig} apenas alcanza los 194.893,20 m³/año. Por su parte, el Embalse Cabuy pierde anualmente unos 530.685 m³ de agua por efectos de la evaporación (Fig. 7(b)), lo cual representa tan solo un 4,70% de su volumen total (11.300.000 m³).

Al confrontar todas las actividades productivas en la Figura 8, se observa que el sector agrícola es el que tiene un mayor peso en la Huella Hídrica total de la cuenca del río Tirgua, con un 34,46% de los recursos hídricos comprometidos (67.903.251,79 m³/año); le sigue el sector doméstico, con 33,93% (66.858.233,49 m³/año), y en tercer lugar el sector pecuario, el cual compromete un 31,23% de los recursos hídricos (61.542.998,38 m³/año). La actividad industrial tiene un peso muy bajo en la presión de demanda/contaminación hídrica, con tan solo un 0,11%.

En cuanto al peso específico por tipo de Huella Hídrica, se tiene que en la cuenca del río Tirgua, la Huella Hídrica gris tiene un efecto dominante en cuanto a la presión sobre el recurso hídrico, ya que compromete anualmente unos 100.365.583,9 m³ de agua, lo cual representa un 50,93% de la HH total (Fig. 9). Este resultado indica que, del total de recursos hídricos consumidos anualmente en la cuenca, la mayoría termina con una elevada carga de contaminantes. Por su parte, la biomasa vegetal cultivada requiere anualmente unos 76.045.705,97 m³ de agua para su funcionalidad fisiológica y la producción agrícola derivada (38,59% del total), lo que sugiere que los cultivos y pastos demandan grandes cantidades de agua proveniente de las lluvias cada año, y que absorben de forma directa y desde el suelo. La Huella Hídrica azul es diferencialmente inferior, al comprometer unos 20.637.086,22 m³ de agua para los usos agrícola y pecuario (10,47% del total). Este volumen es extraído de la cuenca y no regresa a ella (agua que se evapora, se incorpora en productos como agua virtual o es consumida por plantas, personas y animales).

Estos resultados son altamente similares a los obtenidos en otras evaluaciones HH a nivel de cuenca, en

FIGURA 8
CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE LOS SECTORES PRODUCTIVOS A LA HUELLA HÍDRICA TOTAL DE LA CUENCA DEL RÍO TIRGUA



Fuente: elaboración propia.

los cuales la tendencia general es que la HH agrícola sea la más elevada, seguida de la doméstica y la industrial (Aldaya y Llamas, 2008; CCTA, 2013a; IDEAM, 2015; Salmoral *et al.*, 2011).

6. Oferta hídrica de la cuenca del río Tirgua.

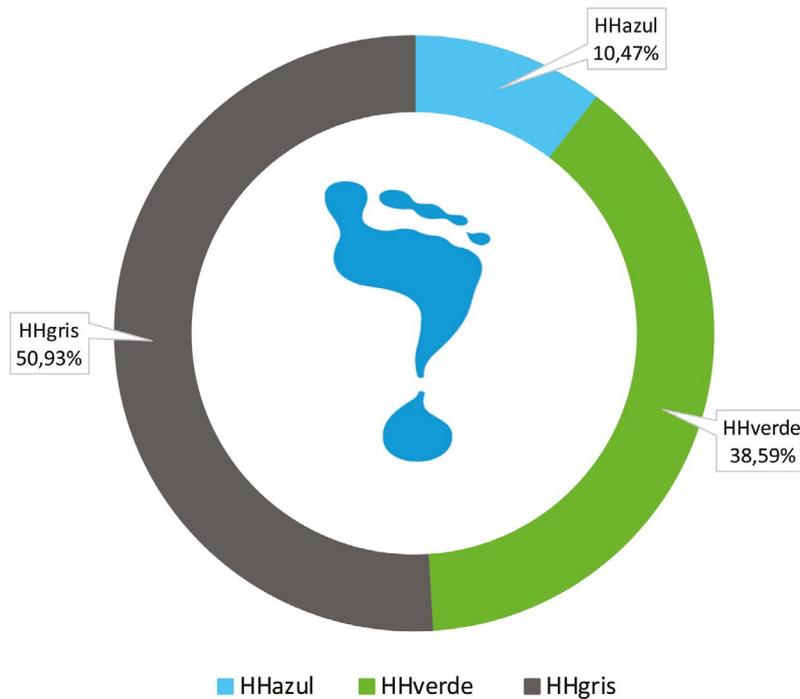
La HH Total de la cuenca del río Tirgua es de 197.048.376 m³/año, que aún está lejos de alcanzar la oferta anual del agua de la cuenca, la cual se estimó en unos 1138.423.803 m³ anuales, lo que quiere decir que la presión antropógena sobre la cuenca alcanza actualmente el 17,31% de sus recursos hídricos anuales. La Figura 10 muestra la relación porcentual que constituye la oferta hídrica de la cuenca. El 60,35% de la oferta corresponde al almacenamiento subterráneo del Acuífero de Nirgua-Salom, el cual contiene unos 687.000.000 m³ (Grisolía y Rojas, 2005). El río Tirgua, por su parte, concentra anualmente un volumen de escorrentía de 440.123.803 m³/año, lo cual representa un 38,66% de la oferta total. El Embalse Cabuy, almacena unos 11.300.000 m³ de agua, tan solo un 0,99% del total ofertado.

Teniendo en cuenta el relevante papel funcional que cumple el río Tirgua como sistema receptor, dilu-

yente y transportador de aguas residuales, reflejado en el valor de Huella Hídrica gris, el volumen fluvial circulante resulta el cuerpo de agua más comprometido para este uso, ya que el río Tirgua recibe anualmente un volumen de aguas residuales equivalente al 22,8% del total circulante (100.365.583,9 m³). Si bien el volumen restante (77,2%) puede resultar suficiente para diluir y transformar el volumen de agua gris, esto puede representar desafíos futuros, considerando la dinámica demográfica, y una eventual expansión de la agricultura, la ganadería o la actividad industrial en la región. De igual manera, dada la marcada estacionalidad climática característica de la región, la recesión de los caudales durante la estación seca puede comprometer temporalmente la función de dilución del río, frente al constante volumen de agua gris que ingresa al cauce durante todo el año.

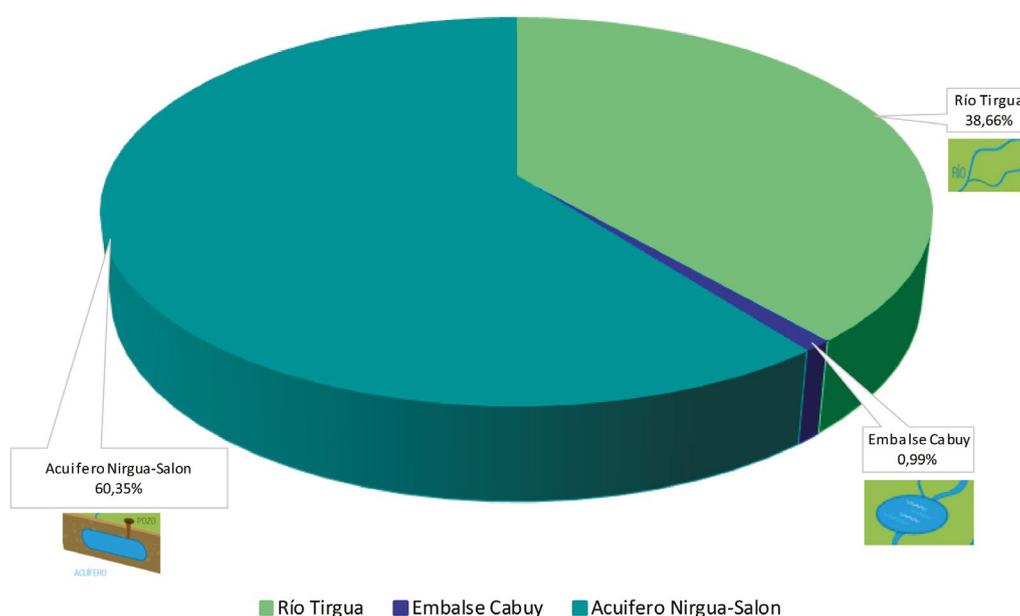
Es preciso recordar que los acuíferos subterráneos son muy sensibles a la extracción de agua y a la variabilidad climática, y que particularmente el Acuífero de Nirgua-Salom es una de las principales fuentes de agua subterránea del país que está en vías de agotamiento por su sobreexplotación (Grisolía y Rojas, 2005; Jegat, 2016). Ello significa que, la sobre explotación del acuífero podría generar una disminución

FIGURA 9
CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE LOS TIPOS DE HUELLA HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO TIRGUA



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 10
OFERTA HÍDRICA ANUAL DE LA CUENCA DEL RÍO TIRGUA



Fuente: elaboración propia.

futura de la oferta neta de agua en la zona, generando por tanto un aumento en la presión sobre los recursos hídricos superficiales, concretamente sobre el río Tirgua y sobre el Embalse Cabuy.

DISCUSIÓN

Pertinencia de la evaluación en el contexto actual del país.

Si bien esta evaluación fue conducida en un contexto diacrónico delimitado por las razones anteriormente expuestas, ello no le resta relevancia ni utilidad a la misma; estos resultados pueden retratar la condición de la cuenca del Tirgua frente al aprovechamiento de sus recursos hídricos en el pasado reciente, y sobre todo, el impacto que esta dinámica genera en los flujos hídricos superficiales circulantes, como también en los almacenados.

La cuenca del río Tirgua presenta una notable oferta de recursos hídricos superficiales (circulantes y almacenados) y subterráneos, lo cual, a simple vista sugiere que no existe riesgo alguno de conflictos de disponibilidad hídrica en el corto plazo. No obstante, los resultados obtenidos en la Huella Hídrica gris (HHg) deben ser vistos con especial atención, sobre todo si se tiene en cuenta que los mismos pueden estar subestimados debido a la escasez de datos básicos que

eran necesarios para su estimación. Tal como lo afirma Sotelo (2015), el hecho de poseer altos niveles de recursos hídricos no siempre tiene efectos netamente positivos en muchas regiones, ya que estas suelen también presentar las mayores cotas de “agua gris”, pues las aguas residuales son vertidas sin control alguno a los cuerpos superficiales. De acuerdo con la citada autora, Venezuela es uno de los países con mayor huella hídrica gris en América Latina (5000 – 10000 Hm³/año), por lo que los resultados de este trabajo en cierto modo validan esta afirmación, y deben servir como referencia para llamar la atención a entidades públicas y privadas acerca de la urgente necesidad de monitoreo y evaluación de los sistemas fluviales del país, y reconsiderar su rol como agentes de almacenamiento y transporte de aguas residuales de diversas fuentes antropógenas.

Una oferta netamente positiva de recursos hídricos como la del Tirgua, tampoco debe ser interpretada literalmente como sinónimo de que exista una alta disponibilidad de agua dulce en plena garantía, pues la HHg compromete seriamente la calidad del recurso, y disponer de agua potable implica enormes costos que muchos de nuestros países no suelen afrontar con debida atención y rigurosidad. Martínez (2020), afirma que los recursos hídricos del eje norte costero venezolano (en donde se localiza el área de estudio)

presentan altos niveles de contaminación que superan los límites legales establecidos. Paralelamente, la crisis compleja que atraviesa el país ha devenido en un proceso sistemático de deterioro de la infraestructura hidráulica, y del sistema de potabilización y abastecimiento del agua a nivel nacional, lo cual ha venido generando crisis de racionamiento de agua potable y escasez relativa del recurso en muchas localidades (Martínez, 2020).

Esta crisis compleja ha tenido un impacto en todos los niveles institucionales, ocasionando una disrupción en los procesos de registros estadísticos sistemáticos de diversas áreas. En lo que concierne a los sectores productivos, la información desagregada a niveles geográficos inferiores (municipios, cuencas, localidades), ha dejado de registrarse. Ello representa un serio obstáculo para este tipo de investigaciones en el mediano y largo plazo, lo cual es preocupante, sobre todo si se tiene en cuenta que la evaluación de la HH en niveles geográficos inferiores suele ser mucho más útil, ya que existe mayor precisión en la representación de los procesos y por ende en su cuantificación (Sotelo, 2016). El agravamiento de la crisis compleja nacional en los últimos ocho años, hace sumamente difícil el poder extrapolar los resultados obtenidos a los tiempos actuales.

En el sector agrícola y pecuario, se usaron en este trabajo los datos del último censo agrícola realizado en el país en 2008. Posterior a esa fecha, no existe información desagregada al nivel geográfico estudiado, por lo que resulta sumamente difícil monitorear la evolución experimentada por este sector en los últimos años. La Confederación de Asociaciones de Productores Agropecuarios de Venezuela – FEDEAGRO compila estadísticas de ambos sectores a escala nacional, única información sistemática disponible. Es obvio que el sector agropecuario venezolano ha atravesado un enorme revés en los últimos tiempos, aunque las tendencias son muy diferenciales entre rubros. Considerando los rubros dominantes en la cuenca, el café y el maíz mostraron entre el 2008 y 2019 un retroceso en cuanto a la superficie cultivada nacional del orden del 14% y 36%, respectivamente (FEDEAGRO, 2020). La naranja, por su parte, tuvo un incremento en superficie cultivada nacional del 28% durante el mismo período; siendo un cultivo de tradición en esta región, es muy probable que la superficie cultivada dentro de la cuenca haya aumentado, o al menos se haya mantenido estable durante los últimos años. El café es un cultivo relevante, ya que genera altos valores de HHAv y HHAg, mientras que el

maíz es un cultivo altamente demandante de riego y de agroquímicos (Arévalo, 2012). Tales razones hacen que las variaciones superficiales que estos cultivos experimenten en la cuenca, tendrán un impacto notable en la HHA.

El sector pecuario, por su parte, ha venido experimentando un retroceso entre 2008 y 2019 a nivel nacional, con reducciones del orden del 11% para los bovinos, y del 35% para las aves (FEDEAGRO, 2020). Es altamente probable que en la cuenca del Tirgua esta tendencia se haya replicado, sobre todo en el sector avícola, por ser altamente dependiente de insumos importados.

En cuanto al sector industrial, las estadísticas regionales y locales son prácticamente inexistentes, por lo que es difícil establecer con precisión su trayectoria reciente en la cuenca. A nivel nacional se tiene que, para el año 2015 (hito cronológico de la información utilizada en el trabajo), la industria manufacturera representaba el 13,38% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional. Esta cifra se redujo a un 7,70% para el año 2018 (Confederación Venezolana de Industriales [CONINDUSTRIA], 2020). Ello sugiere que, muchas de las industrias de la zona pudieran haber reducido, o bien paralizado sus actividades durante los últimos años.

En el sector doméstico, la situación es aún mucho más compleja de analizar. El último censo Nacional en Venezuela se realizó en el 2011, con información demográfica disponible para todos los niveles geográficos político-administrativos (regiones, estados, municipios y parroquias). A partir de ese año solo se cuenta con estimaciones y proyecciones hechas por organismos nacionales (INE, Proyecto Encuesta Nacional de Condiciones de Vida [INSO-ENCOVI], 2020) e internacionales (Comisión Económica para América Latina [CEPAL], 2020; UN, 2020), de las cuales se extrajo la información usada en este trabajo. No obstante, la agudización de la crisis venezolana a partir del 2016, y el consecuente éxodo migratorio masivo ocurrido desde entonces, además de los aumentos en las tasas de mortalidad, han generado una disrupción en la dinámica demográfica nacional, siendo extremadamente difícil establecer con precisión el estatus demográfico reciente a niveles municipales/locales. De acuerdo con el INE (2020), la población del país en 2019 era de 32.065.000 hab. Otros organismos como la CEPAL (2020) y UN (2020) la estimaron en 28.516.000, y para INSO-ENCOVI (2020), la estimación fue de 28.435.940 hab. La tendencia revela que muchos estados del país han venido experimentando recientemente un crecimiento demográfico negativo. En el caso específico de

los estados que territorialmente conforman la cuenca, la población del estado Carabobo se redujo en un 8% respecto al 2011; en los estados Cojedes y Yaracuy, hubo un crecimiento de apenas 3,06 y 1,99 %, respectivamente (INSO-ENCOVI, 2020). Ello sugiere que, en la cuenca del Tirgua la dinámica demográfica ha presentado cambios muy ligeros en los últimos años, por lo que, los resultados de la Huella Hídrica Doméstica (HHD) aún conservan validez interpretativa. Ello es importante, teniendo en cuenta que existen centros urbanos en la parte alta de la cuenca, y que generan un notable impacto en la HHg tanto *in situ* como *off site* (aguas abajo). Para Sotelo y Sotelo (2018) los centros urbanos son los mayores generadores de HH, tanto para sí mismas, como para terceras regiones.

Estos argumentos son suficientes para aspirar a que los resultados de esta investigación puedan servir de base para definir estrategias que puedan reorientar el aprovechamiento de los recursos hídricos de la cuenca en el mediano plazo, a partir de medidas que permitan controlar y reducir de forma efectiva la producción de agua gris y la consecuente HHg. Dada la relevancia excepcional del recurso agua en el desarrollo regional y en la ordenación territorial, se espera que este trabajo pueda servir de inspiración para la aplicación sistemática de este enfoque en otras cuencas del país, que acusan una problemática y complejidad territorial similares o mayores que la cuenca del río Tirgua.

CONCLUSIONES

La cuenca del río Tirgua ostenta un balance positivo entre la Huella Hídrica total estimada y la oferta hídrica neta de la cuenca, ya que la demanda teórica de recursos hídricos por parte de la población y de las actividades productivas de la región, solo alcanza el 17,31% de la oferta hídrica total de la cuenca. No obstante, debe quedar claro que las estimaciones de Huella Hídrica fueron hechas con base en las estadísticas disponibles, cuya escala y validez temporal son relativas, o bien deficiente en cuanto al nivel de detalle requerido para la evaluación.

En la Cuenca del Río Tirgua, el componente de Huella Hídrica gris (HHg) es el de mayor relevancia, al comprometer anualmente unos 100.365.583,9 m³ de agua, lo cual representa más de la mitad de la Huella Hídrica total. Ello demuestra el papel dominante del río Tirgua como vector ambiental que cumple la funcionalidad de: receptor, diluyente, almacenador y transportador de aguas residuales y efluentes. Dicho papel tenderá a aumentar su dominio en el futuro, en la medida en que las ciudades del entorno crezcan, y

los usos productivos se expandan o intensifiquen.

Los resultados destacan el rol dominante de las actividades agrícola y pecuaria en las demandas netas de agua verde y azul en la cuenca, y en la consecuente producción de agua gris. Por lo tanto, la agricultura y la actividad pecuaria son las actividades que mayor impacto generan en la utilización de los recursos hídricos a nivel de cuenca.

Teniendo en cuenta que en la estimación de la HHAg solo fueron consideradas las adiciones de fertilizantes, es evidente que este indicador está sensiblemente subestimado, con lo cual la Huella Hídrica gris total en la cuenca podría ser significativamente mayor a la estimada en este trabajo.

El bajo impacto del sector industrial en la HH del sector industrial, podría deberse a los bajos volúmenes de producción registrados, y a la notable ausencia de datos precisos sobre producción industrial y sus requerimientos de agua en el país, lo que sugiere que las estimaciones de este sector podrían estar notablemente subestimadas.

Anualmente el sector doméstico desecha grandes volúmenes de agua gris; la huella del sector va en función del tamaño de la población y su dinámica, y considerando que la población es una variable en constante aumento, los volúmenes de aguas servidas seguramente representarán un gran problema para los gestores y actores del territorio a futuro.

Finalmente, debe quedar claro que estos resultados constituyen una aproximación a la Huella Hídrica total de la cuenca, y que una evaluación más rigurosa requeriría incorporar los volúmenes de agua virtual contenida en los productos manufacturados, lo cual no pudieron estimarse debido a la notable ausencia de datos necesarios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aldaya, M. y Llamas, R. (2008). *Water footprint analysis for the Guadiana River basin*. Santander, España: Fundación Marcelo Botín.
- Aldaya, M., Martínez-Santos, P. y Llamas, M. (2010). Incorporating the water footprint and virtual water into policy: Reflections from the Mancha Occidental Region, Spain. *Water Resources Management*, 24 (5), 941 – 958. doi: <https://www.doi.org/10.1007/s11269-009-9480-8>
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la deter-*

- minación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, Italia: FAO-ONU.
- Arévalo, D. (2012). *Una mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica*. Bogotá-Colombia: WWF.
- Bellorín, M. (2008). Geografía de la industria de alimentos en Venezuela. En Fundación Empresas Polar (Ed.). *GeoVenezuela: Medio Humano, Establecimientos y Actividades*. Tomo 4. (pp. 224 - 287). Caracas, Venezuela: Fundación Empresas Polar.
- BIER. (2011). *A Practical Perspective on Water Accounting in the Beverage Sector*. Beverage Industry Environmental Roundtable, Water Footprint Network. Recuperado de http://waterfootprint.org/media/downloads/BIER-2011-WaterAccounting-SectorPerspective_1.pdf
- Blanco, H., Lara, M., Velezmoro, A. y Aguilar, V. (2014). Consumo de agua en actividades domésticas. Caso de estudio: Estudiantes de la asignatura saneamiento ambiental de la UCV. *Revista de la Facultad de Ingeniería UCV*, 29(1), 51-56.
- Builes, E. (2013). *Cuantificación y análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica agrícola y pecuaria de la cuenca del río Porce* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- CTTA. (2013a). *Resumen de resultados: Evaluación de la Huella Hídrica en la cuenca del río Porce*. Medellín, Colombia: Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia, COSUDE.
- CTTA. (2013b). *Guía Metodológica de Aplicación de Huella Hídrica en Cuenca: Huella Hídrica en la cuenca del río Porce*. Medellín, Colombia: Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia, COSUDE.
- Chapagain, A. y Hoekstra, A. (2007). Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 21, 35-48. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-006-9039-x>
- CEPAL. (2020). *Observatorio Demográfico 2019*. (LC/PUB.2019/24-P). Santiago de Chile, Chile.
- FEDEAGRO. (2020). Estadísticas Agrícolas. Recuperado de <https://fedegro.org/estadisticas-agricolas/produccion-agropecuaria/produccion/>
- CONINDUSTRIA. (2020). Indicadores Macroeconómicos. Recuperado de <https://www.conindustria.org/indicadores/>
- Domene, E. (2014). Changing patterns of water consumption in the suburban Barcelona: lifestyles and welfare as explanatory factors. *Investigaciones Geográficas*, 61(1), 39 - 53. doi: <https://www.doi.org/10.14198/INGEO2014.61.03>
- Dong, H., Geng, Y., Sarkis, J., Fujita, T., Okadera, T. y Xue, B. (2013). Regional water footprint evaluation in China: A case of Liaoning. *Science of the Total Environment*, 442, 215 – 224. doi: <https://www.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.049>
- Dumont, A., Salmoral, G. y Llamas, M. 2013. The Water Footprint of a river basin with a special focus on groundwater: the case of Guadalquivir Basin, Spain. *Water Resources and Industry*, 1-2, 60 – 76. doi: <https://www.doi.org/10.1016/j.wri.2013.04.001>
- El Sitio Avícola. (2016). *Consumo de agua en pollos*. Recuperado de <http://www.elsitioavicola.com/articulos/1755/consumo-de-agua-en-pollos/>
- FAO. (2016). *AQUASTAT Glossary*. Recuperado de <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/glossary/search.html?lang=en>
- Fulton, J., Cooley, H. y Gleick, P. (2012). *California's Water Footprint*. Oakland, Estados Unidos: Pacific Institute.
- García, A. (2013). *La huella hídrica como indicador de presiones: aplicación a la cuenca del Duero y al sector porcino español* (Tesis Doctoral). Universidad de Alcalá de Henares. Alcalá de Henares, España.
- Gobernación del Estado Cojedes., Corpocentro., Ministerio del Poder Popular para el Ambiente., INTI., ULA., UNELLEZ. y UNESR. (2011). *Caracterización Físico-Natural Socioeconómica del Estado Cojedes. Base Diagnóstica para la Ordenación Territorial del Estado Cojedes*. San Carlos, Venezuela: Gobernación del Estado Cojedes.
- Godoy, S., Muñoz, G., Quijada, T., D' Aubeterre, R. y Gómez, G. (2001). *El peso corporal y su relación con la talla en caprinos*. Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Recuperado de <http://www.saber.ula.ve/revistaunellez/pdfs/146-149.pdf>
- González, A. (2000). *Informe nacional sobre la gestión del Agua en Venezuela*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Recuperado de es.scribd.com/document/346009181/Informe-Gestion-Del-Agua-en-Venezuela

- Grisolía, J. y Rojas, M. (2005). *Evaluación de la Disponibilidad de Aguas Subterráneas en el área de Nirgua-Salom, estado Yaracuy* (Tesis de pregrado). Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- Guerrero, R. (Ed.). (1998). *Fertilización de cultivos en clima cálido*. Bogotá, Colombia: Monómeros Colombo Venezolanos, S.A.
- Hardy, L. y Garrido, A. (2010). *Análisis y evaluación de las relaciones entre el agua y la energía en España*. Santander, España: Fundación Marcelo Botín.
- Hoekstra, A. y Hung, P. (2002). *Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade*. Delft, Países Bajos: UNESCO – IHE Institute for Water Education.
- Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M. y Mekonnen, M. (2011). *The water footprint network assessment manual: Setting the global standard*. Londres, Inglaterra: Earthscan.
- IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá, Colombia.
- INE. (2001). *República Bolivariana de Venezuela: Censo general de Población y Vivienda. Tomos I y II*. Caracas, Venezuela: Instituto Nacional de Estadística.
- INE. (2011a). *Informe Geoambiental 2011: Estado Carabobo*. Caracas, Venezuela: Instituto Nacional de Estadística.
- INE. (2011b). *Informe Geoambiental 2011: Estado Cojedes*. Caracas, Venezuela: Instituto Nacional de Estadística.
- INE. (2011c). *Informe Geoambiental 2011: Estado Yaracuy*. Caracas, Venezuela: Instituto Nacional de Estadística.
- INE. (2011d). *República Bolivariana de Venezuela: XIV Censo Nacional de Población y Vivienda Resultados Básicos: Total Nacional y Entidades Federales*. Caracas, Venezuela. INE. Recuperado de http://www.ine.gov.ve/index.php?option=com_content&view=category&id=95&Itemid=9
- INE. (2020). Proyección de la población 2000 – 2050. Recuperado de http://www.ine.gov.ve/index.php?option=com_content&view=category&id=98&Itemid=51
- INSO- ENCOVI. (2020). Informe ENCOVI 2019 – 2020. Recuperado de <https://www.proyectoencovi.com/informe-interactivo-2019>
- Instituto Nacional de Estadística. (2013). *Uso del agua en la industria manufacturera (2007-2010)*. Instituto Nacional de Estadística del Reino de España. Recuperado de http://www.ine.es/daco/daco42/ambiente/aguaindu/uso_agua_indu0710.pdf
- Jegat, H. (07-08 de Julio de 2016). *Variabilidad Climática y su relación con la disponibilidad de aguas subterráneas en Venezuela* [Discurso principal]. Foro: Variabilidad y Cambio Climático. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Kenny, J., Barber, N., Hutson, S., Linsey, K., Lovelace, J. y Maupin, M. (2009). *Estimated use of water in the United States in 2005. Circular N° 1344*. Reston, Estados Unidos: United States Geological Survey (USGS).
- Lopez, L., Beltrán, J., Ramos, A., López, H., Bermejo, J., y Pérez, J. (2009). *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España: Parte II - Abonado de los principales cultivos en España*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Secretaria General Técnica, Centro de Publicaciones. Recuperado de http://www.magrama.gob.es/es/agricultura/publicaciones/02_FERTILIZACI%C3%93N%28BAJA%29_tcm7-207769.pdf
- Mager, J. y McCann, M. (2012). Procesado Químico. En Organización Internacional del Trabajo (Ed), *Enciclopedia de la OIT*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo – Ministerio de Empleo y Seguridad Social – Gobierno de España. Recuperado de <https://www.insst.es/documents/94886/161971/Capítulo+77.+Procesado+químico>
- Man, S. y F. Vega. (2017). *Dinámica de aprovechamiento de los recursos hídricos en la cuenca del río Tirgua mediante el enfoque de la Huella Hídrica (HH)* (Tesis de pregrado). Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- Martínez, A. (2015). *Requerimientos nutricionales del ají Capsicum annuum L. y su relación con rendimiento bajo condiciones ambientales de Palmira, Valle del Cauca. Palmira-Colombia* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Martínez, E. (2020). La crisis de los servicios y los ecosistemas fluviales: prelude de una emergencia ambiental en Venezuela. En D. Rodríguez-Olarte (Ed.). *Ríos en Riesgo de Venezuela*. Vol. III. Colección Recursos Hidrobiológicos de Venezuela (pp.

- 149 – 172). Barquisimeto, Venezuela: Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado.
- Martínez, J., Leonte, L., Castellano, G., e Higuera, A. (2003). Evaluación de 25 líneas de quinchoncho *Cajanus cajan* (L.) mill sp. con fines de selección para su uso como leguminosa arbustiva forrajera. *Revista Científica FCV-LUZ*, 13(3), 173-181
- Mendes, A. (2011). *Nutrición de búfalos en regiones tropicales*. Recuperado de <http://es.scribd.com/doc/73400819/Nutricion-de-Bufalos-en-Regiones-Tropicales#scribd>
- MINEA. (2015). *Registro de Actividades Capaces de Degradar el Ambiente*. San Carlos, Venezuela: MINEA.
- MPPAT. (2008). *VII Censo Agrícola Nacional*. Base de datos productivos y socioeconómicos del sector agrícola venezolano. Caracas: Ministerio del Poder Popular para Agricultura y Tierras.
- Morros, M. (2001). *Cultivo de la caraota con énfasis en el estado Lara*. Maracay, Venezuela: Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas.
- Muñoz, R. (2006). *Características en Canal y rendimiento al corte vendible de las razas bufalinas Murrah y Mediterráneo* (Tesis de pregrado). Universidad Rafael Urdaneta. Maracaibo, Venezuela.
- Murillo, J., Barros, J., Roncallo, B. y Arrieta, G. (2014). Requerimientos hídricos de cuatro gramíneas de corte para uso eficiente del agua en el Caribe seco colombiano. *Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecu*, 15(1), 83-99.
- OCEI. (1990). *República de Venezuela: Censo general de Población y Vivienda. Tomos I y II*. Caracas, Venezuela: Oficina Central de Estadística e Informática.
- Paredes, F. (2009). *Nociones Elementales de la Climatología e Hidrología del estado Cojedes*. San Carlos-Venezuela: Universidad Experimental de los Llanos Ezequiel Zamora.
- Pellicer, F. (2014). *Huella Hídrica y Planificación Hidrológica: Aplicación en la Demarcación Hidrográfica del Segura* (Tesis doctoral). Universidad de Murcia. Murcia, España.
- Ramírez, C., Patel, M. y Blok, K. (2006). How much energy to process one pound of meat? A comparison of energy use and specific energy consumption in the meat industry of four European countries. *Energy*, 31, 2047–2063. doi: <https://www.doi.org/10.1016/j.energy.2005.08.007>
- Rázuri, L., Rosales, J., Juárez, L., Hernández, J. y Romero, E. (2008). Estimación de las demandas hídricas en la zona de Santa Rosa-Mérida, con fines de planificación del uso de los recursos hidráulicos. *Agricultura Andina*, 14, 7-21.
- Romero, E., Rodríguez, A., Rázuri, L., Suniaga, J. y Montilla, E. (2009). Estimación de las necesidades Hídricas del cultivo de Pepino (*Cucumis sativus* L.), durante las diferentes etapas fenológicas, mediante la tina de evaporación. *Agricultura Andina*, 16, 56-69.
- Ruíz, J., Medina, G., González, I., Flores, H., Ramírez, G., Ortiz, C., Byerly, K. y Parra, R. (2013). *Requerimientos Agroecológicos de Cultivos*. (2ª Ed.) Tepatlán de Morelos, México: INIFAP - CIRPAC.
- Salmoral, G., Dumont, A., Aldaya, M., Rodríguez, R., Garrido, A. y Llamas, M. 2011. Análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir. Fundación Botín. *Observatorio del Agua*, Nº 3.
- Sánchez, C., Arrieta, A., Flórez, S., Mercado, T., Martínez, J. y Martínez A. (2004). Requerimiento hídrico de la berenjena *Solanum melongena* L. bajo riego por goteo en el Valle del Sinú. *Agronomía Colombiana*, 22(2), 170-176.
- Sotelo, J., Olcina, J., García, F. y Sotelo, M. (2012). Huella hídrica de España y su diversidad territorial. *Estudios Geográficos*, Vol. LXXIII (272), 239 – 272. doi: 10.3989/estgeogr.201209. doi: <https://www.doi.org/10.3989/estgeogr.201209>
- Sotelo, J. (2016). Tras las “Huellas” del agua en España. *Boletín de la Real Sociedad Geográfica*, Tomo CLI, 259 – 288.
- Sotelo, J. y Sotelo, M. (2018). Consumo de agua y “Huella Hídrica” de las ciudades españolas. *Estudios Geográficos*, Vol. LXXIX (284), 115 – 140. doi: <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201805>
- Sotelo, M. (2015). Cuestiones de escala en el ámbito de la “Huella Hídrica”. *Observatorio Medioambiental*, Vol. 18, 9 – 37. doi: https://doi.org/10.5209/rev_OBMD.2015.v18.51284
- Thompson, J., Porras, I., Tumwine, J., Mujwahuzi, M., Katui-Katua, M., Johnstone, N. y Wood, L. (2001). *Drawers of Water II: 30 years of change in domestic water use & environmental health in east Africa*. London, England: International Institute for Environment and Development.
- Tolón, A., Bolívar, X. y Fernández, J. (2013). Huella hídrica y sostenibilidad del uso de los recursos

- hídricos. Aplicación al Poniente Almeriense. Estudios previos y medidas de eficiencia. *Revista Electrónica del Medio Ambiente*, 14 (1), 56 – 86. doi: http://dx.doi.org/10.5209/rev_MARE.2013.v14.n1.42123
- UN. (2020). *Demographic Yearbook 2019*. 70th Issue. New York, USA. U.N. Department of Economic and Social Affairs.
- Zárate, E., Fernández, A. y Kuiper, D. (2017). *Guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica*. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Zeng, Z., Liu, J., Koeneman, P., Zarate, E. y Hoekstra, A. (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, 2771 – 2781. doi: <https://www.doi.org/10.5194/hess-16-2771-2012>
- Zhang, G., Mathews, R., Frapporti, G. y Mekonnen, M. (2014). *Water Footprint Assessment for the Hertfordshire and North London Area*. London, United Kingdom: Environment Agency. Report RESE000335.
- Zhao, X., Yang, H., Yang, Z., Chen, B. y Qin, Y. (2010). Applying the Input-Output Method to Account for Water Footprint and Virtual Water Trade in the Haihe River Basin in China. *Environmental Science & Technology*, 44 (23), 9150 – 9156. doi: <https://www.doi.org/10.1021/es100886r>