

Impacto de las obras de plantas de tratamiento de aguas residuales sobre el río Bogotá con la metodología de la huella hídrica

Impact of sewage treatment plant works on the Bogota River using the water footprint methodology

Yulia Ivanova¹

Sharith Yessenia Parra Cendales²

DOI: <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.29.7436>

RESUMEN

Bogotá se considera el principal causante de la contaminación del río homónimo debido al desarrollo de todas las actividades socioeconómicas y a la carencia de un sistema adecuado de descontaminación de los vertimientos. Con miras aun al manejo ambientalmente sostenible de los efluentes, se proponen los proyectos sanitarios de ampliación de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Salitre y de la construcción de la PTAR Canoas. Con el fin de evaluar el acercamiento de la ciudad hacia la sostenibilidad ambiental, se aplicó la metodología de la huella hídrica para el escenario actual de tratamiento de aguas residuales y el escenario futuro con el funcionamiento de las nuevas obras sanitarias. Se concluye que la huella hídrica gris total se disminuirá 3,8 veces, lo que representa una disminución porcentual de un 87 % de los sólidos totales en suspensión, indicando un acercamiento significativo al manejo ambiental deseado de los vertimientos en la capital colombiana.

Palabras clave: Bogotá; Huella hídrica gris; Tratamiento del agua; Urbanización; Vertimientos.

ABSTRACT

The Bogotá city is considered the main cause of pollution of the Bogotá river because to the development of all socio-economic activities and the lack of an adequate decontamination system for discharges. With a view to an environmentally sustainable management of the effluents, the sanitary expansion projects of the Salitre residual water treatment plant and the construction of the Canoas residual water treatment plant are proposed. To evaluate the city's approach to environmental sustainability, the water footprint methodology was applied for the current wastewater treatment scenario and for the future scenario with the operation of the new sanitation works. It concludes that the total gray water footprint will be reduced by 3,8 times which represents a percentage decrease of 87 % of the total solids in suspension, indicating a significant approach to the environmental management of discharge the Colombian capital.

Keywords: Bogotá City; Gray water footprint; Water treatment; Urbanization; Discharge.



Como citar este artículo: Y. Ivanova y S. Y. Parra Cendales, Impacto de las obras de plantas de tratamiento de aguas residuales sobre el río Bogotá con la metodología de la huella hídrica, *ingeniare*, vol. 2, n.º 29, dic. 2020.

1. Ingeniera Hidróloga, M.Sc. en Gestión Ambiental, Facultad de Ingeniería de la Universidad Militar Nueva Granada, Grupo de Investigación IGE-Ingeniería, Geomática e Investigación. Correo: yulia.ivanova@unimilitar.edu.co

2. Ingeniera Civil, Facultad de Ingeniería de la Universidad Militar Nueva Granada, Grupo de Investigación IGE-Ingeniería, Geomática e Investigación. Correo: u1102384@unimilitar.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el mundo atraviesa por acelerados procesos de crecimiento demográfico y urbanización [1] que afectan directamente el entorno ecosistémico [2], generando así núcleos de presión sobre los recursos naturales, de manera que el recurso hídrico es uno de los más intervenidos por participar en la mayoría de los ciclos que ocurren en la naturaleza [3].

Bogotá sustenta su vida en la disponibilidad del recurso hídrico que sirve de base para el desarrollo de las actividades socioeconómicas a través de las cuales se genera el 25,7 % del PIB nacional.

El crecimiento de la ciudad genera presiones tanto en disponibilidad como en la calidad de fuente receptora de los vertimientos. En las últimas décadas se han realizado esfuerzos encaminados a la disminución de los consumos per cápita del agua [4], pero el tema de descontaminación de los vertimientos al río Bogotá ha sido abordado de manera insuficiente [5].

Actualmente, la capital colombiana cuenta con el sistema de alcantarillado mixto en manos de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAB), conformado por tres cuencas de captación de aguas que son Chingaza, Tibitóc y Tunjuelo, para en adelante tomar partida las actividades de recolección, transporte y tratamiento primario de los residuos líquidos [6] hasta la PTAR Salitre (zona norte) en compañía del río Fucha y Tunjuelo (subcuencas que vierten sus aguas directamente sin ningún tratamiento previo), de manera que se realizan estos tres vertimientos a la cuenca del río Bogotá.

Considerando el principio ambiental “de la cuna a la tumba” [7], la responsabilidad de la capital está en tratar las aguas residuales y devolver así el recurso hídrico a la fuente receptora en el mismo estado en el que fue captado hasta su concentración ambientalmente aceptable. Según lo mencionado, Bogotá carece de un sistema de tratamiento adecuado para la descontaminación de los vertimientos, para lo cual, hacia el 2008, se tomó la decisión de poner en marcha soluciones en cuanto a obras sanitarias con la ampliación de la PTAR Salitre para el año 2022 a través de la implementación de un sistema secundario convencional de lodos activados con ampliación de caudal a 8 m³/s y la construcción de la PTAR Canoas para el 2027 a través del tratamiento de las aguas provenientes de las cuencas Fucha y Tunjuelo, con una capacidad de 16 m³/s y remoción de sólidos totales en suspensión (SST) en un 40 %. Con dichas obras sanitarias se pretende disminuir el impacto negativo de la ciudad sobre la calidad del recurso hídrico del río Bogotá.

En la presente investigación se evalúa que tanto se acercará Bogotá al manejo ambientalmente sostenible de los efluentes al río con el mismo nombre. Existen diferentes metodologías para identificar el mencionado impacto, pero la mayoría de estas no evidencian de manera cuantitativa el resultado esperado de dicha evaluación. En el estudio se aplicó la metodología de la huella hídrica, la cual se define como un indicador alternativo que permite evaluar los efectos de la contaminación en los vertimientos

al río Bogotá, así como los volúmenes de agua necesarios para ser vertidos a la fuente receptora con el fin de llevar la concentración de SST hasta su concentración ambiental.

Actualmente, la metodología de la huella hídrica se utiliza ampliamente con el fin de evaluar los impactos de los diferentes sectores consumidores del agua como el sector agrícola [8], industrial [9] y económico [10], entre otros. Existen estudios recientes en los que la metodología se aplica para evaluar el impacto de las PTAR sobre la calidad ambiental de los ríos [11].

El resultado de la investigación sirve de indicador para dar a conocer cómo la capital colombiana se acerca al uso sostenible y la calidad del recurso hídrico.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

Existen diferentes metodologías para evaluar impactos ambientales de diferentes actividades humanas sobre sistemas siconaturales. Entre estas se pueden relacionar la huella ecológica [12], la de carbono [13] y la de la huella hídrica [14], entre otros. En el estudio se utilizó el concepto de la “huella hídrica”, desarrollado en el 2002 por Arjen Hoekstra [15], porque resultados de evaluación de contaminación del agua se obtienen en unidades volumétricas que se pueden integrar a los estudios de demandas directas del agua y dar así a conocer de manera integral los efectos de uso y de contaminación del agua [16].

La huella hídrica total se compone de tres elementos diferenciados por los colores azul (demandas hídricas superficiales), verde (uso del agua evaporada) y gris (indicador de apropiación del agua dulce tanto para usos directos como indirectos [9] que integra los efectos de contaminación del recurso hídrico). Mediante el estudio de los efectos de los efluentes de la ciudad al río Bogotá se empleó el concepto de la huella hídrica gris que se relaciona con el volumen del agua necesario para diluir los contaminantes asociados a los vertimientos hasta el valor de la concentración natural ambiental en el río receptor [17].

3. METODOLOGÍA

Partiendo del concepto de la huella hídrica gris, esta se define a través de la siguiente ecuación:

$$HH_{gris} = \frac{L}{c_{m\acute{a}x} - c_{nat}} \quad (1)$$

Donde:

HH_{gris} : huella hídrica gris, (volumen/tiempo);

L : carga contaminante, (masa/tiempo);

$c_{m\acute{a}x}$: concentración máxima aceptable, (masa/ volumen);

c_{nat} : concentración natural en el cuerpo de agua receptora, (masa/volumen);

La evaluación de la huella hídrica gris de I Bogotá se aplicó para dos escenarios de tratamiento de aguas residuales.

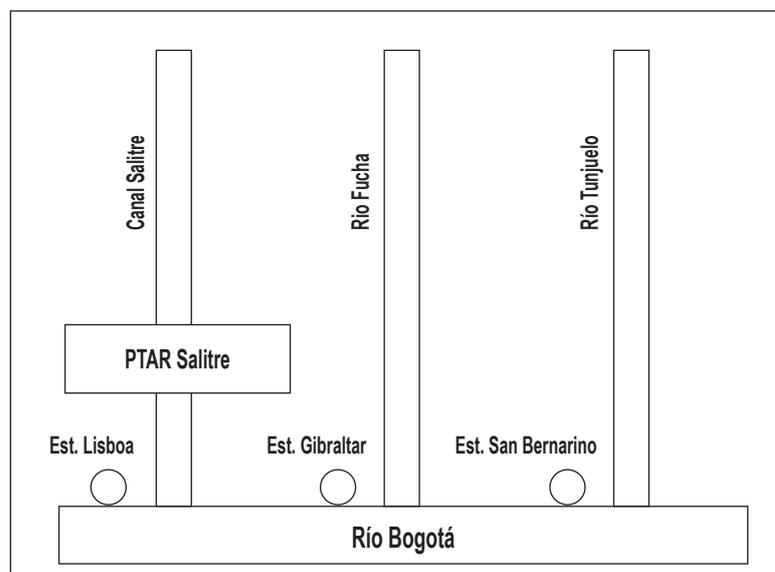
El primero se relaciona con las condiciones actuales a), en las que se cuenta con tres puntos de vertimiento al río Bogotá por las descargas de la PTAR Salitre y los ríos Fucha y Tunjuelo. A través de los dos últimos vertimientos se realizan descargas directas sin ningún tipo de tratamiento, mientras que el canal Salitre direcciona las aguas residuales a la PTAR con el mismo nombre, donde se hace el tratamiento primario de las aguas residuales. De este modo, la huella hídrica gris de la ciudad de Bogotá en el escenario actual se calcula sumando los tres componentes correspondientes a cada uno de los efluentes. Por la concentración natural se entiende la concentración de los SST aguas arriba del primer vertimiento realizado por Bogotá, correspondiente a la estación hidrológica Lisboa, monitoreada por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). En cuanto a la concentración máxima permisible se adopta el valor de 90 mg/L estipulado según la Resolución 0631 de 2015 [18]. De esta manera, las ecuaciones para la definición de la huella hídrica gris de Bogotá en el escenario actual son las siguientes:

$$HH_{gris\ actual} = HH_{Salitre} + HH_{Fucha} + HH_{Tunjuelo} \quad (2)$$

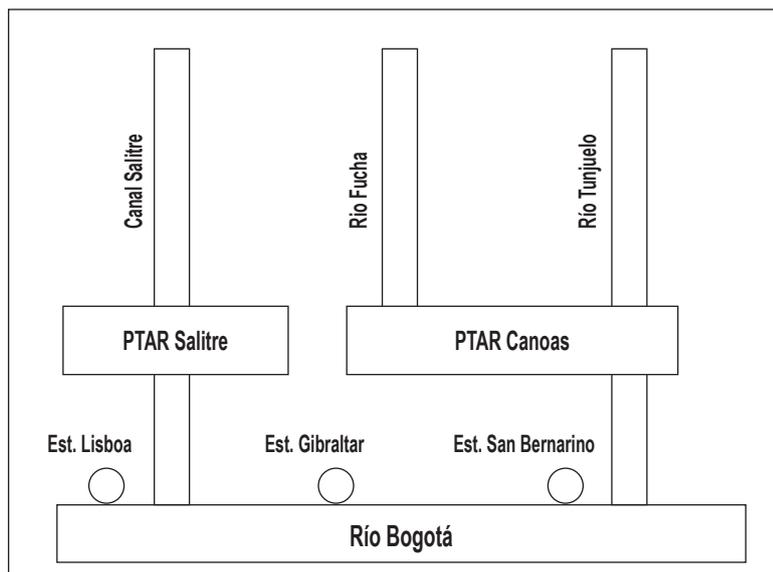
$$HH_{Salitre} = \frac{L_{Salitre}}{C_{m\acute{a}x} - C_{Lisboa}} \quad (3)$$

$$HH_{Fucha} = \frac{L_{Fucha}}{C_{m\acute{a}x} - C_{Lisboa}} \quad (4)$$

$$HH_{Tunjuelo} = \frac{L_{Tunjuelo}}{C_{m\acute{a}x} - C_{Lisboa}} \quad (5)$$



a) escenario actual



b) escenario futuro (2027)

Figura 1. Escenarios de tratamiento de agua residual en la ciudad de Bogotá

Fuente: elaboración propia.

El segundo escenario se proyecta hacia el 2027 con la terminación de obras de la ampliación de la PTAR Salitre y la construcción de la PTAR Canoas (Figura 1b).

Teniendo en cuenta que no se conoce con certeza la evolución de la contaminación del río Bogotá aguas arriba de la ciudad, para el escenario futuro, en razón a la concentración natural se tomará el mismo valor que el de SST en el escenario actual, correspondiente a la estación de calidad de agua Lisboa. Según lo mencionado, la huella hídrica gris de Bogotá representa la suma de los dos componentes asociados a la PTAR Salitre y Canoas.

$$HH_{gris\ futuro} = HH_{Salitre\ futuro} + HH_{Canoas} \quad (6)$$

Dónde:

$$HH_{Salitre\ futuro} = \frac{L_{Salitre\ futuro}}{c_{m\acute{a}x} - c_{Lisboa}} \quad (7)$$

$$HH_{Canoas} = \frac{L_{Canoas}}{c_{m\acute{a}x} - c_{Lisboa}} \quad (8)$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente estudio se consultaron datos de las diferentes entidades encargadas de la gestión del agua del río Bogotá, entre las que se encuentran la EAB, la CAR y la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) con los datos de monitoreo de la calidad del recurso hídrico.

En la Tabla 1 se presentan los valores de los SST y los caudales de descarga para la situación actual de Bogotá y la proyección de los parámetros de entrada asociados a la ampliación de la PTAR Salitre y la construcción de la PTAR Canoas con sus respectivas fuentes de información.

Tabla 1. Datos iniciales para cálculo de la huella hídrica gris de Bogotá (escenario actual y futuro)

Parámetro	Unidad	Valor	Fuente de la información
Escenario actual			
<i>PTAR Salitre</i>			
Q	(m ³ /s)	4,0	[19]
Carga	(% remoción)	60,0	[19]
SST	(mg/L)	30,0	[19]
<i>Río Fucha</i>			
Q	(m ³ /s)	9,2	
SST	(mg/L)	189,0	[20]
<i>Río Tunjuelo</i>			
Q	(m ³ /s)	6,7	[20]
SST	(mg/L)	346,0	[20]
Escenario futuro			
<i>PTAR Salitre</i>			
Q	(m ³ /s)	8,0	[19]
SST	(mg/L)	30,0	[19]
<i>PTAR Canoas</i>			
Q	(m ³ /s)	16,0	[21]
SST	(mg/L)	53,5	[22]

Fuente: elaboración propia.

Con base en los datos iniciales se calcularon los componentes de la huella hídrica gris para los dos escenarios en mención. Los resultados se muestran en la Tabla 2 y en la Figura 2.

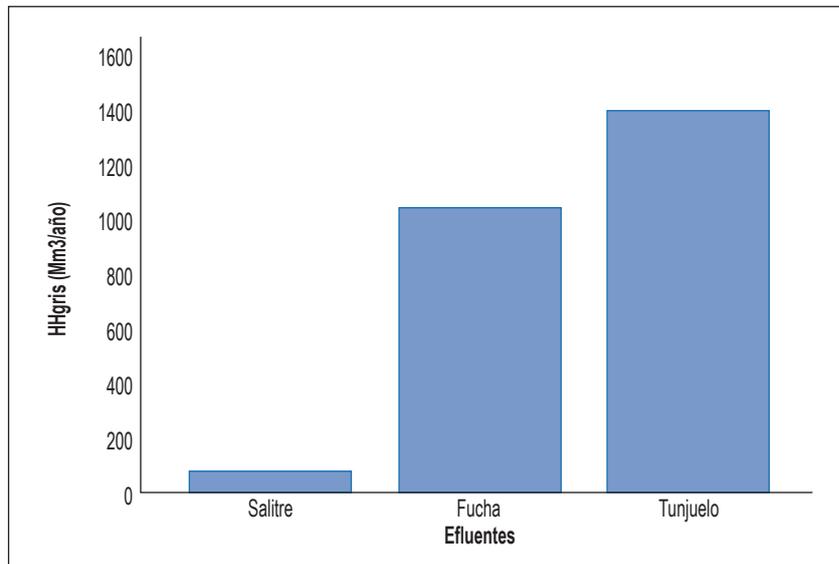
Tabla 2. Huella Hídrica gris de la ciudad de Bogotá

	Escenario actual			Escenario futuro		
	Parámetro	Un	Valor	Parámetro	Un	Valor
	C_{Lisboa}	(Kg / m ³)	0,0185	C_{Lisboa}	(Kg / m ³)	0,0185
	$C_{m\acute{a}x}$	(Kg / m ³)	0,07	$C_{m\acute{a}x}$	(Kg / m ³)	0,07
	PTAR Salitre			PTAR Salitre		
	Q	(m ³ / s)	4,0	Q	(m ³ / s)	8,0
	SST Salitre	(Kg / m ³)	0,03	SST Salitre	(Kg / m ³)	0,03
	L Salitre	(Kg / s)	0,12	L Salitre	(Kg / s)	0,24
	HH Salitre	(m ³ / s)	2,3319	HH Salitre	(m ³ / s)	4,66
		(Mm ³ / a\~no)	73,54		(Mm ³ / a\~no)	147,08
	Cuenca del r\~o Fucha			PTAR Canoas		
	Q	(m ³ / s)	9,17	Q	(m ³ / s)	16,0
	SST Fucha	(Kg / m ³)	0,189	SST Canoas	(Kg / m ³)	0,0535
	L Fucha	(Kg / s)	1,7331	L Canoas	(Kg / s)	0,8566
	HH Fucha	(m ³ / s)	33,679	HH Canoas	(m ³ / s)	16,646
		(Mm ³ / a\~no)	1062,1		(Mm ³ / a\~no)	524,97
	Cuenca del r\~o Tunjuelo					
	Q	(m ³ / s)	6,7			
	SST Tunjuelo	(Kg / m ³)	0,346			
	L Tunjuelo	(Kg / s)	2,3182			
	HH Tunjuelo	(m ³ / s)	45,048			
		(Mm ³ / a\~no)	1420,6			

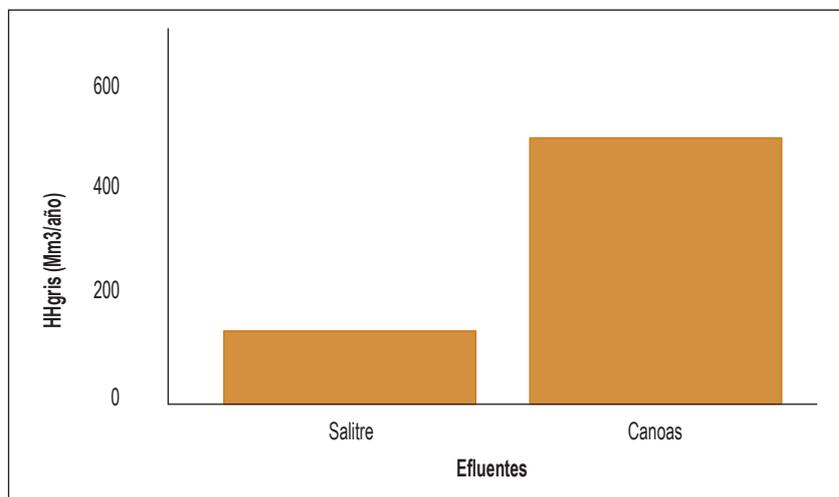
Fuente: elaboraci3n propia.

Al sumar los aportes de los afluentes de Salitre, Fucha y Tunjuelo en el escenario actual de tratamiento de aguas residuales, la huella hídrica gris de la ciudad es de 2556,30 mm³/año. Este valor equivale al volumen de agua que anualmente debería ser vertido al río Bogotá para diluir la carga contaminante de SST hasta su concentración natural. El 55,6 % (o 1420,65 mm³/año) pertenece al aporte del río Tunjuelo, el 41,55 % (o 1062,11 mm³/año) hace parte de la cuenca del río Fucha, y el 2,9 % (o 73,54 mm³/año) corresponde a la huella hídrica gris de la cuenca del río Salitre. De acuerdo con los datos obtenidos de la huella hídrica actual, se evidencia que el aporte más relevante se da por la cuenca del río Tunjuelo, en la cual se descargan los vertimientos de productos de industrias textiles y confeccionados para el uso doméstico, sector de curtiembres y bebidas, sector de producción, transformación y conservación de carne y derivados cárnicos [23]. Según los censos realizados, en la cuenca del río Fucha, como segundo aportante a la huella hídrica gris, se han encontrado más de 180 vertimientos industriales [23].

En razón a su aporte a la contaminación del río Bogotá se destacan talleres metalmecánicos, industrias de alimentos, químicos y de textil [24], mientras que el aporte del sector de curtiembres y otros tipos de vertimientos son relevantes para la cuenca del río Tunjuelo [23], pero no son significativos para la cuenca del río Fucha. De manera gráfica los resultados se presentan en la Figura 2.



a) Escenario actual



b) Escenario futuro (2027)

Figura 2. Representación gráfica de la huella hídrica gris de la ciudad de Bogotá

Fuente: elaboración propia.

Según los resultados del escenario futuro, la huella hídrica gris total de Bogotá será de 672,05 mm³/año. El 78,1 % de la huella hídrica gris se relaciona con la PTAR Canoas y el 21,9 % corresponde al aporte de la PTAR Salitre. El valor de la PTAR Canoas equivalente a los 524,97 Mm³/año implica la unión y tratamiento de vertimientos de los ríos Fucha y Tunjuelo de manera conjunta.

Las obras sanitarias del escenario futuro como son la ampliación de la PTAR Salitre y construcción de la PTAR Canoas generan una disminución de la huella hídrica gris total en 3,8 veces en comparación con el escenario actual de tratamiento de aguas residuales de Bogotá. En cuanto a la huella hídrica gris de la PTAR Canoas, a pesar de su alto grado de magnitud, es 4,7 veces menor que la de los ríos Fucha y Tunjuelo en el escenario actual.

Se hace necesario mencionar que el crecimiento del valor de la huella hídrica gris de la PTAR Salitre es aparente dado por las siguientes razones: en primer lugar, en los datos actuales de vertimientos del canal Salitre no se cuantifican en estadísticas oficiales tanto caudal como concentración de los SST de los volúmenes del agua que superan los 4 m³/segundo, no son tratados por la PTAR Salitre y se vierten directamente al río Bogotá. Por consiguiente, la huella hídrica del escenario actual de descargas no tiene en cuenta un componente que potencialmente puede incidir en el valor final de la huella hídrica gris de la cuenca Salitre. En adición, la huella hídrica del escenario futuro tiene en cuenta el aumento en el caudal tratado, lo que directamente lleva al aumento en el valor de la huella hídrica gris. Todos estos factores conjuntamente influyen en que el valor futuro de la huella hídrica gris sea mayor que la del escenario actual. Al contrastarlos, se observa que esta tendrá una disminución de un 73,3 %.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos evidencian el impacto positivo significativo que generará la ampliación de la PTAR Salitre y la construcción de la PTAR Canoas sobre el mejoramiento de la calidad del agua del río Bogotá, lo cual se evidencia en los valores cuantitativos del cálculo de huella hídrica en comparación con el escenario actual de tratamiento, así como en la disminución del impacto negativo por las descargas de la capital colombiana sobre la salubridad de la corriente.

A través de la cuantificación de la metodología de la huella hídrica en la calidad del recurso hídrico aplicado a los escenarios de tratamiento se conceptualiza la adecuación y optimización objeto de la gestión ambiental del agua de Bogotá en los valores de disminución de la huella hídrica gris que indican un avance en el tema de la gestión integral del recurso hídrico en la capital colombiana, donde hasta el momento la mayoría de las acciones se relacionaban con la gestión de los consumos del agua y el tema de las descargas de los vertimientos no estaba en orden de prioridad.

Considerando el principio ambiental “de la cuna hasta la tumba” [7], el manejo del recurso hídrico en la ciudad comienza a tener rasgos de integralidad, no solo al impactar los consumos del recurso hídrico, sino en la responsabilidad de la sociedad frente a la necesidad de tratamiento de las aguas residuales [27].

Vista la situación desde esta perspectiva, la disminución de la huella hídrica gris debe ser un proceso continuo con fines de minimizar las concentraciones de las sustancias contaminantes al río Bogotá. Este objetivo se puede lograr no solo con los procesos de tratamiento de aguas residuales en las PTAR, sino al promover políticas e incentivos de la producción limpia en las industrias que se encuentran en el perímetro urbano de la ciudad [28]. Eso permitiría lograr que las aguas residuales lleguen a las PTAR con menores concentraciones de sustancias contaminantes y se disminuya la huella hídrica gris de Bogotá.

En el estudio se demostró que la metodología de la huella hídrica puede servir como indicador para evaluar el acercamiento de las áreas urbanas al manejo sostenible de los vertimientos a través de los resultados numéricos. El método, en parte, puede ser complementado con la adición de la consideración de otros tipos de contaminantes conservativos y no conservativos para una evaluación integral del estado del recurso hídrico.

El estudio demuestra que, en los próximos años, Bogotá tendrá avances significativos en el tema de tratamiento de aguas residuales, de modo que disminuya de manera importante el aporte de los SST a la fuente receptora. No obstante, aplicando el principio de responsabilidad ambiental “de la cuna a la tumba”, el valor de huella hídrica debería ser igual a cero, y devolver las aguas de efluentes en el mismo estado en el que fueron extraídas de las fuentes abastecedoras de Bogotá.

REFERENCIAS

- [1] D. N. Koons, T. W. Arnold y M. Schaub, “Understanding the demographic drivers of realized population growth rates», *Eco. App.*, pp. 2102-2115, 2017.
- [2] G. I. Andrade, F. Remolina y D. Wiesner, “Assembling the pieces: A framework for the integration of multi-functional ecological main structure in the emerging urban region of Bogotá, Colombia”, *Urb. Ecos.*, pp. 723-739, dic. 2013.
- [3] AEET, “La evaluación de los Ecosistemas del Milenio. Las relaciones entre el funcionamiento de los ecosistemas y el bienestar humano”, *Ecos.*, 2007.
- [4] OAB, “Consumo promedio per cápita de agua en el sector público distrital-PIGAAGUA”, Bogotá D. C., 2008.
- [5] Eab, “Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado” Bogotá, 2006.
- [6] EAB, “Plan de saneamiento y manejo de vertimientos” Bogotá, 2016.
- [7] G. Mesa Cuadros, *Derechos ambientales en perspectiva de integralidad*. Bogotá D. C.: Universidad Nacional de Colombia, 2013.

- [8] J. G. Lozano Arango, D. Arévalo Uribe y J. Sabogal Mogollón, “Estudio nacional de huella hídrica Colombia, sector agrícola”, *Rev. Int. Sost., Tec. Hum.*, 2011.
- [9] C. M. M. Cardona y B. Congote Ochoa, “La Huella Hídrica, un indicador de impacto en el uso del agua”, *Rev. Tecn.*, pp. 20-25, 2013.
- [10] A. K. Chapagain, “Water footprint: state of the art: what, why, and how?” en *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, pp. 153-163, 2017.
- [11] L. Corominas, S. Morera y M. Poch, “Water footprint assessment in wastewater treatment plants”, Elsevier, pp. 4741-4748, 2016.
- [12] Y. Gu, H. Wang, Z. P. Robinson, X. Wang, J. Wu, X. Li, J. Xu y F. Li, “Environmental footprint assessment of green campus from a food-water-energy nexus”, *Ener. Proc.*, vol. 152, n.º 240, pp. 240–246, 2018.
- [13] R. Mendoza-Flores, R. Quintero-Ramírez y I. Ortiz, “The carbon footprint of a public university campus in Mexico City”, *Carb. Manag.*, vol. 10, n.º 5, pp. 501-511, 2019.
- [14] K. Kandananond, “The application of water footprint and six-sigma method to reduce the water consumption in an organization”, *Int. J. Geom.*, vol. 17, pp. 21-27, 2019.
- [15] A. Y. Hoekstra, “Water footprint network” , 1 dic. 2017. [En línea]. Disponible en: <http://waterfootprint.org/en/>
- [16] Y. Ivanova, E. A. Domínguez Calle y A. Sarmiento, “Evaluación del efecto sobre el metabolismo hídrico de la ciudad Bogotá como respuesta al cambio en el modelo de gestión del agua en los años 90”, *Amb. y Des.*, vol. 22, n.º 42, pp. 1-10, 2018.
- [17] A. Hoekstra, A. Chapagain, M. Aldaya y M. Mekonnen, *The water footprint assessment manual*. Londres, Washington: Earthscan, 2011.
- [18] MADS, “Resolución 0631 de 17 de marzo de 2015”, Bogotá D.C.: MInambiente, 2015.
- [19] CAR, “Plan de Gestión Social para el proyecto de ampliación y optimización de PTAR Salitre”, Bogotá D. C.: CAR, 2017.
- [20] SDA y Universidad de los Andes, *Calidad del recurso hídrico de Bogotá D. C.*, Bogotá D. C.: Ediciones Uniandes, 2012.
- [21] EAB, “Radicado E-2016-048599” EAAB, Bogotá D. C., 2016.
- [22] EAB, “Radicado-2017-098358” EAAB, Bogotá D. C., 2017.
- [23] IDEAM, “VI Fase de seguimiento de efluentes industriales y corrientes superficiales de Bogotá D. C.”, Ideam, Bogotá D.C., 2016.
- [24] SDA y EAAB, *VIII fase del programa de seguimiento y monitoreo de efluentes industriales y corrientes superficiales de Bogotá D. C.*, Bogotá D. C.: SDA, 2015.
- [25] J. P. Rodríguez Miranda, C. A. García Ubaque y C. A. Zafra Mejía, “El análisis del ciclo de vida aplicado a las plantas de tratamiento de aguas residuales”, *Cien. Soc.*, pp. 617-636, 2016.
- [26] EAB, “Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá”, 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/portal/%21ut/p/c5/hY09D4lwGIR_0nsUWmCsii0GqKZBgYUwGGwi4GD8_UJcXJS78bkPamj22L1c3z3dNHZ3qqgRbeTZ3laawYRsh1QmSST84LCRYua1aLdK6iDMAM-

POACu4PaG0PIJ_pX1Z_r4Siu9jplbHmcmVB_AP_7e_cPyQBBV6Gq5UrqzUMVWCHkMFd7z1b4I-1vLc%21/dl3/d3/. [Último acceso: 15 02 2018].

- [27] H. Camacho-Oviedo, D. Campos-Núñez, I. Mercado Martínez, N. Cubillán-Acosta, y G. Castellar-Ortega, "Uso de las cáscaras de papa (*Solanum tuberosum* L) en la clarificación del agua de la Ciénaga de Malambo", *Inv. Inn. Ing.*, vol. 8, n.º 1, pp. 100-111, feb. 2020.
- [28] R. Campos Segura, "Contaminación en la cuenca alta del río Bogotá: diagnóstico y ensayo", *Épsilon*, pp. 191-202, 2010.