



La evaluación de la Huella Hídrica Gris en una Demarcación Hidrográfica

Autor: Francisco Pellicer-Martínez

Institución: Instituto Universitario del Agua y del Medio Ambiente (INUAMA)

Otros autores: José Miguel Martínez Paz (Instituto Universitario del Agua y del Medio Ambiente)

Resumen

Los países de la Unión Europea se encuentran en un proceso continuo de Planificación Hidrológica desde la aprobación de la Directiva Marco del Agua. Esta Directiva promueve la gestión integral de los recursos hídricos de una Demarcación Hidrográfica (DH) para lograr el uso sostenible del agua, tal y como se insta en la Conferencia Río +20 celebrada en 2013, que permita conseguir el buen estado ecológico de las aguas superficiales, subterráneas, de transición y costeras. Para ello es de gran ayuda el uso de nuevos indicadores que sean capaces de representar en una única unidad homogénea todas las afecciones que el ser humano realiza sobre los recursos hídricos.

Uno de estos indicadores es la Huella Hídrica (HH), que estandariza la producción económica en una unidad común: el volumen de agua dulce consumido. Existen tres tipos diferenciados por colores según el uso que se hace del agua: el agua verde es la precipitación que se almacena en el suelo en forma de humedad y su consumo genera HH Verde; el agua azul son los recursos hídricos y su extracción del medio genera HH Azul; y la acción de contaminar los recursos hídricos genera HH Gris. Así, este indicador muestra los volúmenes de agua consumidos y su origen, considera los usos del suelo y da una orientación preliminar sobre los volúmenes necesarios para reducir la contaminación causada por la actividad económica. Por tanto, indica de forma global el impacto de las actividades económicas sobre los recursos hídricos de una DH. Si bien el cálculo de este indicador viene recomendado en la Instrucción de Planificación Hidrológica, no indica cual es la metodología más adecuada para determinarlo.

Dada la novedad de este indicador, existen aún muy pocas aplicaciones prácticas que se centran en el sector agrario, ya que es el que más recursos consume, y sólo determinan la HH Verde y Azul, soslayando el cálculo de la componente Gris. El objetivo de este trabajo es proponer una metodología para determinar el valor de la HH Gris de una DH, considerando la contaminación por vertidos urbanos y por retornos de regadío. Asimismo, se van a tener en cuenta la depuración de los vertidos urbanos y la reutilización de parte de éstos para su uso en regadío.

Esta metodología se ha puesto en práctica en la DH del Segura, una de las que presenta mayores problemas de contaminación en España. Los resultados obtenidos revelan que el valor de la HH Gris (1.150 hm³/año) no debe ser despreciado en ningún caso, ya que resulta equivalente al de la Azul (1.200 hm³/año) para toda la DH del Segura. El caso práctico también muestra que la depuración y la reutilización son dos acciones básicas para reducir el valor de la HH Gris, ya que sin ellas el valor de esta componente hubiera sido cinco veces más grande (5.560 hm³/año).

Palabras clave: Huella Hídrica Gris, Gestión Integral de Recursos Hídricos, Planificación Hidrológica

1 Introducción

La huella hídrica es un indicador que cuantifica en volumen de agua dulce el impacto que la actividad económica tiene sobre las masas de agua. La primera vez que se hace referencia a este indicador (Hoekstra, 2003) sólo se consideran los consumos de agua, diferenciándolos entre dos colores según el origen del agua consumida: verde si el agua procede de agua de lluvia y azul si son extracciones de los recursos hídricos. Posteriormente se introduce el concepto de huella hídrica gris (Hoekstra & Chapagain, 2008), definido como el volumen de agua dulce requerido para asimilar la carga contaminante de los vertidos en masas de agua, dadas las concentraciones naturales de contaminantes en dichas masas de agua y los límites estándar permitidos. Es un indicador que mide el nivel de contaminación de los recursos hídricos en volumen de agua, lo que permite comparar los impactos causados por los vertidos con aquellos debidos a las extracciones o consumos de agua (Liu et al., 2012; Thaler et al., 2012).

Dada la capacidad de la huella hídrica de homogeneizar en una única unidad común los impactos que se realizan sobre los recursos hídricos (usos del suelo, consumos y contaminación), se está empezando a utilizar de forma global para evaluar políticas de gestión de agua en diversas regiones, como es el caso de California (Fulton et al., 2014). Sin embargo las escasas aplicaciones prácticas existentes en cuencas hidrográficas, que es generalmente la unidad territorial de gestión de los recursos hídricos (CE, 2000), no suelen evaluar la componente gris (Zeng et al., 2012), y si la determinan suele ser de forma parcial (De Miguel, 2013) y sin tener en cuenta la distribución espacio-temporal de dicho indicador (Liu et al., 2012). Esta limitación en el cálculo se debe esencialmente a que no existe una metodología de aceptación general a la hora de evaluar la huella hídrica para una cuenca hidrográfica. No obstante sí que existen otras evaluaciones, como es la de la huella hídrica gris en los principales ríos del mundo teniendo en cuenta los contaminantes nitrógeno y fósforo (Liu et al., 2012), estudios a nivel de sector económico (de Miguel, 2013; Montalván-Estrada et al. 2010), así como otros que se centran en una parte de la huella hídrica de un territorio (van Oel et al., 2009), que revelan la importancia de no despreciar esta componente en el valor final de la huella hídrica.

En España el cálculo de este indicador a nivel de Demarcación Hidrográfica, unidad territorial definida por cuencas hidrográficas, está recogido explícitamente en la Instrucción de Planificación Hidrológica (BOE, 2008), sin embargo no especifica cómo se debe abordar su cálculo. En los planes de cuenca de algunas Demarcaciones Hidrográficas españolas, como la del Segura, se incluye un valor de la huella hídrica que procede de un trabajo previo realizado para toda España (Fundación Mapfre, 2011). Dicho trabajo proporciona dos valores de huella hídrica que no contemplan la componente gris: la *estándar* y la *adaptada*. La primera cuantifica la huella hídrica de los productos y servicios consumidos dentro de la Demarcación Hidrográfica sin tener en cuenta la procedencia de los recursos utilizados en crear esos productos. La segunda, también denominada *interna*, cuantifica el volumen de agua consumido y/o contaminado dentro de la propia Demarcación Hidrográfica. Entre ambos valores está recomendado el uso de la *interna* (Hoekstra et al, 2011) para una Demarcación Hidrográfica, ya que es la unidad de planificación hidrológica y el organismo gestor de la misma es el que establece cuales son los usos de agua permitidos.

Considerando la importancia de incluir la componente gris en el cálculo de la huella hídrica, junto con la recomendación de utilizar la huella hídrica interna para este tipo de área geográfica, y dada la escasez de casos prácticos que aborden el problema de forma completa, el objetivo principal de este trabajo es determinar la huella hídrica gris de una cuenca hidrográfica para así poder utilizar este indicador en la evaluación de la gestión de la misma. Para ello se desarrolla una nueva metodología que combina este novedoso concepto de huella hídrica gris con la simulación completa del ciclo hidrológico antropizado de una cuenca hidrográfica. La simulación de dicho ciclo se lleva a cabo acoplando un modelo hidrológico con la simulación de un sistema de recursos hídricos mediante un sistema soporte a la decisión (DSS). Gracias a esta combinación va a ser posible determinar la huella hídrica gris de toda una cuenca hidrográfica y además, dadas las características de la metodología empleada, va a ser posible abordar los siguientes aspectos: i) los resultados de la huella hídrica gris están asociados a las masas de agua que reciben los vertidos (urbanos y de regadío), diferenciando entre aguas superficiales y subterráneas; ii) los resultados permiten calcular los principales estadísticos, ya que la simulación del sistema de recursos hídricos se realiza a lo largo de una serie de años, iii) va a ser posible analizar la influencia que, tanto la depuración de las aguas residuales como la reutilización de parte de éstas aguas depuradas por parte de los regadíos, tienen sobre el valor final de la huella hídrica gris. Esta metodología se ha puesto en práctica en una de las cuencas hidrográficas más complejas de Europa, ya que contempla todas las casuísticas que se pueden presentar en una Demarcación Hidrográfica relacionadas con la huella hídrica gris, como son los vertidos a masas de aguas superficiales, vertidos difusos hacia las masa de agua subterráneas, depuración y reutilización.

2 Metodología

La metodología general que se desarrolla en este trabajo se compone de dos partes independientes que se combinan por primera vez (**Fig. 1**). La primera es la simulación del ciclo hidrológico antropizado, que consiste en modelizar todos los flujos de agua que se producen en una cuenca hidrográfica, para un escenario predeterminado, considerando todas las alteraciones que el ser humano realiza sobre el ciclo hidrológico. Dentro de estos flujos se encuentran tres relacionados con la huella hídrica gris: los retornos de las demandas que se vierten en las masas de agua (tanto superficiales como subterráneas), el volumen de aguas residuales urbanas depuradas, y la reutilización de parte de los retornos depurados. La segunda parte es la aplicación de la formulación estándar de Hoekstra et al (2011) para el cálculo de la huella hídrica gris, utilizando como información de partida los tres flujos nombrados previamente, así como los valores de las concentraciones de sus contaminantes. Sin embargo, para determinar la huella hídrica gris de una cuenca hidrográfica compleja, como es la del caso de estudio, ha sido necesario adaptar la formulación estándar a las características de la misma.

2.1. Simulación del ciclo hidrológico antropizado

La simulación del ciclo hidrológico se lleva a cabo combinando un modelo hidrológico distribuido con un sistema soporte a la decisión (SSD). El modelo hidrológico en cuestión es el modelo SIMPA (Estrela & Quintas, 1996), que simula el ciclo hidrológico natural a escala mensual y proporciona los recursos hídricos de la cuenca hidrográfica en forma de series mensuales de caudales. Estas series se introducen en un sistema soporte a la decisión que simula el sistema de explotación de recursos hídricos (SERH). Para este

caso se ha seleccionado el SSD OPTIGES (Andreu et al, 1996), que es un modelo de optimización lineal que distribuye los recursos hídricos entre las demandas teniendo en cuenta que los caudales ecológicos y las demandas ambientales son prioritarios, y que existe una jerarquía de usos entre los diferentes tipos de demandas.

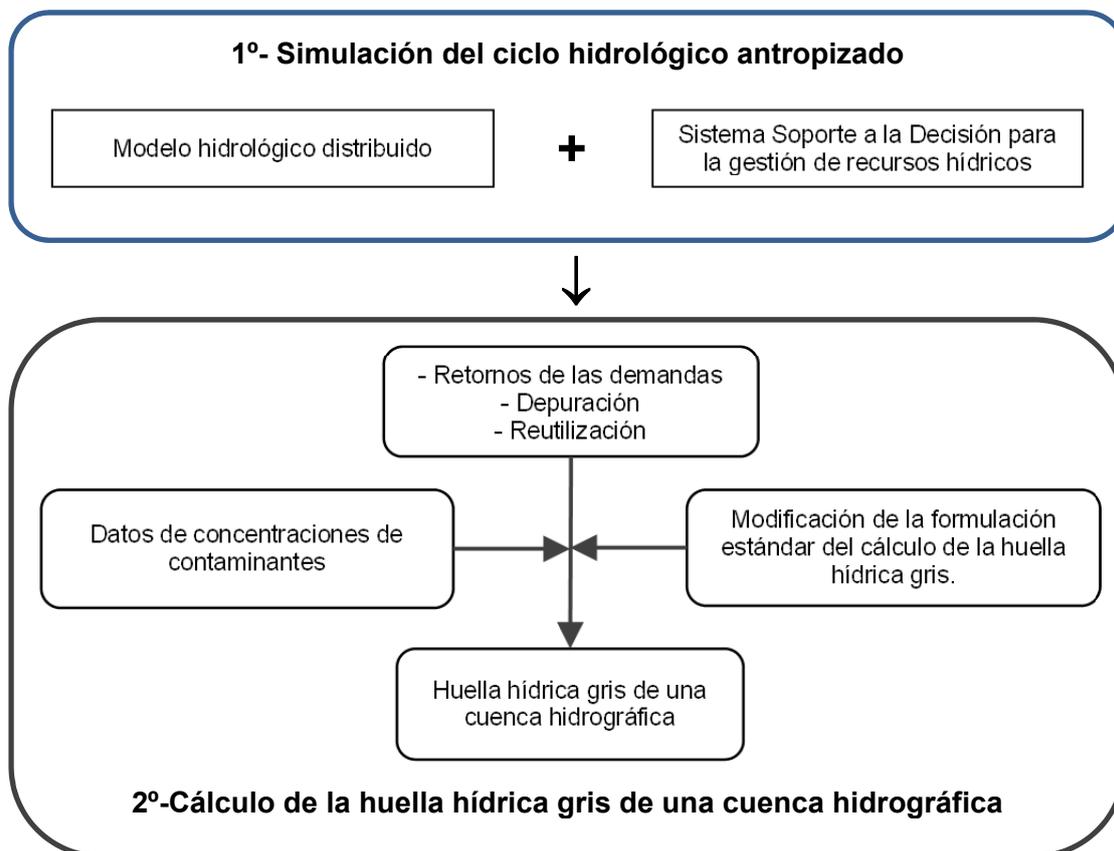


Fig. 1. Esquema metodológico general

2.1.1 Modelo hidrológico distribuido: SIMPA

El modelo SIMPA es un modelo hidrológico de balance distribuido (Estrela & Quintas, 1996) que aplica en cada celda la estructura conceptual del modelo de Témez (Témez, 1977). La fase superficial del ciclo hidrológico la simula de forma distribuida, mientras que la fase subterránea la modeliza de forma agregada (Mouelhi, 2006). Los resultados que proporciona son series mensuales de mapas de escorrentía en régimen natural y de infiltración natural en acuíferos, pudiéndose determinar series de caudales en puntos clave de la gestión de una cuenca, como son los embalses, las confluencias y la recarga de los acuíferos. Dichas series de caudales son los inputs que se introducen en el DSS. Además de sus características particulares, este modelo es el que se utiliza habitualmente en la planificación hidrológica en España, por lo que los caudales utilizados en la aplicación práctica son los mismos que utiliza el organismo de cuenca como recursos hídricos de la cuenca hidrográfica. Asimismo, este modelo ha sido

contrastado en la cabecera de la cuenca hidrográfica, demostrándose que es uno de los que mejores resultados proporciona (Pellicer-Martínez & Martínez-Paz; 2014).

2.1.2 Sistema Soporte a la Decisión: OPTIGES

La simulación del sistema de explotación de recursos hídricos (SERH) de la cuenca hidrográfica para un escenario predeterminado se lleva a cabo mediante el sistema soporte a la decisión (SSD) Optiges (Andreu, 1992), que es un módulo de AquatoolDMA (Andreu, 1996). Este SSD simula a escala mensual el SERH completo de una cuenca hidrográfica mediante la optimización de una red de flujo conservativa que recrea sus principales características. Dicha red se construye con elementos tales como conducciones, nudos, embalses, demandas, retornos, recursos hídricos, etc. El objetivo de este SSD es distribuir los recursos hídricos, que entran al modelo en forma de series históricas de caudales en régimen natural, entre los diferentes tipos de demandas siguiendo tres criterios. El primero es que los caudales ecológicos en cauces naturales tienen prioridad sobre las demandas, tal y como establece la DMA (CE, 2000). El segundo es repartir los recursos hídricos disponibles entre las demandas siguiendo un orden de prioridad de usos con el fin de repartir los déficits entre éstas en periodos de escasez, como indica la instrucción de planificación hidrológica (BOE, 2008). Por último, es que el volumen almacenado en los embalses al final de la simulación sea máximo. Para los dos primeros criterios las demandas y los caudales ecológicos se dividen en niveles (n_i y n_i') de suministro, a fin de garantizar un suministro mínimo a cada demanda y un caudal mínimo en los cauces naturales con caudal ecológico establecido. El número máximo de niveles es cuatro, teniendo mayor prioridad los primeros sobre los últimos. Este objetivo se define matemáticamente con la optimización de la Eq. (1) para un periodo de N años, en la que el primer sumatorio hace mínimos los déficits de los caudales ecológicos, el segundo hace mínimos los déficits en las demandas, y el último sumatorio hace que el modelo almacene agua en los embalses al final del periodo de optimización (N.12).

$$F.O = \text{Minimizar} \left[\sum_{t=1}^{N.12} \left[\sum_{i=1}^{n_c} \sum_{j=1}^{n_i} \alpha_{i,j} d_{i,j,t} + \sum_{i=1}^{n_d} \sum_{j=1}^{n_i'} \beta_{i,j} d'_{i,j,t} \right] - \sum_{i=1}^{n_e} \delta_i v_{iN.12} \right] \quad (1)$$

Donde:

$\alpha_{i,j}$: coeficiente asignado al posible déficit $d_{i,j,t}$ del nivel j del caudal ecológico de la conducción i en el mes t .

$\beta_{i,j}$: coeficiente asignado al posible déficit $d'_{i,j,t}$ del nivel j de suministro de la demanda i en el mes t .

δ_i : coeficiente asignado al volumen almacenado en el embalse i al final del periodo de optimización N.12.

$V_{i,N.12}$: volumen almacenado en el embalse i en la última iteración de la optimización N.12.

n_c : número de conducciones introducidas en la red de flujo, cada una de ellas con el caudal mínimo dividido en n_i niveles.

n_d : número de demandas en la red de flujo, cada una de ellas dividida en n_i' niveles.

n_e : número de embalses en la red de flujo.

n_i : número de niveles en que se divide el caudal mínimo de la conducción i .

n_i : número de niveles en que se divide la demanda i .

N : número de años de optimización. $N.12$ indica que en cada año se realizan 12 iteraciones, una por mes.

La Eq. (1) está sujeta a las siguientes restricciones:

- Ecuación de continuidad en los nudos y en los embalses.
- El caudal circulante por una conducción es inferior a su capacidad máxima.
- Todas las variables son positivas o nulas.

La simulación del SERH con este DSS proporciona todos los caudales que circulan por la red de flujo de la cuenca hidrográfica, entre los que se encuentra los retornos de las demandas y los volúmenes reutilizados. Los retornos de aguas residuales depurados se obtienen como un porcentaje de los retornos urbanos totales a partir de los datos de gestión de las empresas gestoras de las depuradoras, tal y como se indica posteriormente en la aplicación práctica realizada.

2.2 Huella Hídrica gris de una cuenca hidrográfica

2.2.1 Huella hídrica gris de un vertido

La formulación estándar para el cálculo de la huella hídrica gris de un proceso (Eq. (2)) definida por Hoekstra et al. (2011) está diseñada para el vertido puntual de un único contaminante sobre una masa de agua.

$$HH_{Gris} = \frac{L}{c_{max} - c_{nat}} \quad (2)$$

Donde L es la carga contaminante, c_{max} es la concentración máxima permitida en la masa de agua para dicho contaminante, y c_{nat} es la concentración natural de dicho contaminante en la masa de agua si no hubiera sido alterada por la actividad humana.

2.2.2 Huella hídrica gris de un vertido en una cuenca hidrográfica

Para el cálculo de la huella hídrica gris de una cuenca hidrográfica ha sido necesario adaptar la Eq. (2) a las características de este tipo de zona geográfica, para así poder contemplar:

- La existencia de diferentes masas de agua, cada una de ellas con concentraciones naturales y máximas permitidas distintas.
- Que las masas de agua contienen concentraciones naturales del contaminante estudiado.
- Que los vertidos tienen más de un contaminante, siendo el contaminante crítico el que establece el valor de la huella hídrica gris (Hoekstra et al., 2011; Wang & Wu, 2014) de dicho vertido, ya que es el que requiere el máximo volumen de dilución. Por lo que se asume que el volumen de dilución del contaminante que genere la mayor huella hídrica gris es suficiente para diluir el resto de contaminantes.

- El carácter temporal de los vertidos, que viene caracterizado por la simulación del SERH de la cuenca hidrográfica durante un periodo de simulación de N años.

Introducidos estos ajustes, la ecuación de la huella hídrica gris quedaría como sigue (Eq. (3)):

$$HH_{Gris}[j, x, t] = \max[k] \left[\frac{Q_{Ver}[j, t](c_{efl}[j, k, t] - c_{nat}[x, k, t])}{c_{max}[x, k, t] - c_{nat}[x, k, t]} \right] \quad (3)$$

Donde:

- $HH_{Gris}[j, x, t]$: la máxima huella hídrica gris generada por un contaminante k contenido en el vertido j sobre la masa de agua x en el mes t (volumen/tiempo).
- $Q_{Ver}[j, t]$: caudal del vertido j en el mes t (volumen/tiempo).
- $c_{efl}[j, k, t]$: concentración del contaminante k del vertido j en el mes t (masa/volumen).
- $c_{max}[x, k, t]$: concentración máxima permitida del contaminante k del vertido j en la masa de agua x que lo recibe para el mes t (masa/volumen).
- $c_{nat}[x, k, t]$: concentración natural del contaminante del efluente j en la masa de agua x para el mes t (masa/volumen).

2.2.3 Influencia de la depuración y de la reutilización de vertidos urbanos

En la gestión del agua de una cuenca hidrográfica se realizan dos acciones que afectan a los contaminantes que finalmente reciben las masas de agua. Una de ellas es la depuración de los vertidos urbanos, proceso en el que se reducen las concentraciones de los contaminantes contenidos en los mismos. Otra es la reutilización directa de los vertidos urbanos depurados que, en lugar de alcanzar una masa de agua se vuelven a utilizar, por lo que dicho vertido reutilizado no genera huella hídrica gris al no generar impacto directo sobre las masas de agua.

La simulación del ciclo hidrológico antropizado es capaz de identificar y cuantificar estas dos acciones. Determina la parte de retornos urbanos que son depurados, los que no lo son, y aquellos retornos depurados que son reutilizados por otro uso, como es el riego en zonas de escasez (Grindlay et al., 2009). Al disponer esta información es posible incorporarla a la formulación del cálculo de la huella hídrica gris. Para ello, con el fin de no afectar la estructura de la ecuación presentada anteriormente, estas dos acciones se introducen en la Eq. (3) cambiando el valor de la concentración ($c_{efl}[j, k, t]$) de los k contaminantes de cada vertido j , en un mes t , por una concentración equivalente ($C_{Eq}[j, k, t]$). Esta $C_{Eq}[j, k, t]$ tiene en cuenta que el caudal de un retorno urbano está compuesto por un caudal depurado que se reutiliza directamente ($Q_{Dr}[j, t]$), otro que se depura y se vierte ($Q_{Dv}[j, t]$), y otro que se vierte sin ser depurado ($Q_{Sd}[j, t]$). En su cálculo, las concentraciones de los k contaminantes en los caudales depurados se denominan $C_D[j, k, t]$ y las de los caudales sin depurar $C_{Sd}[j, k, t]$.

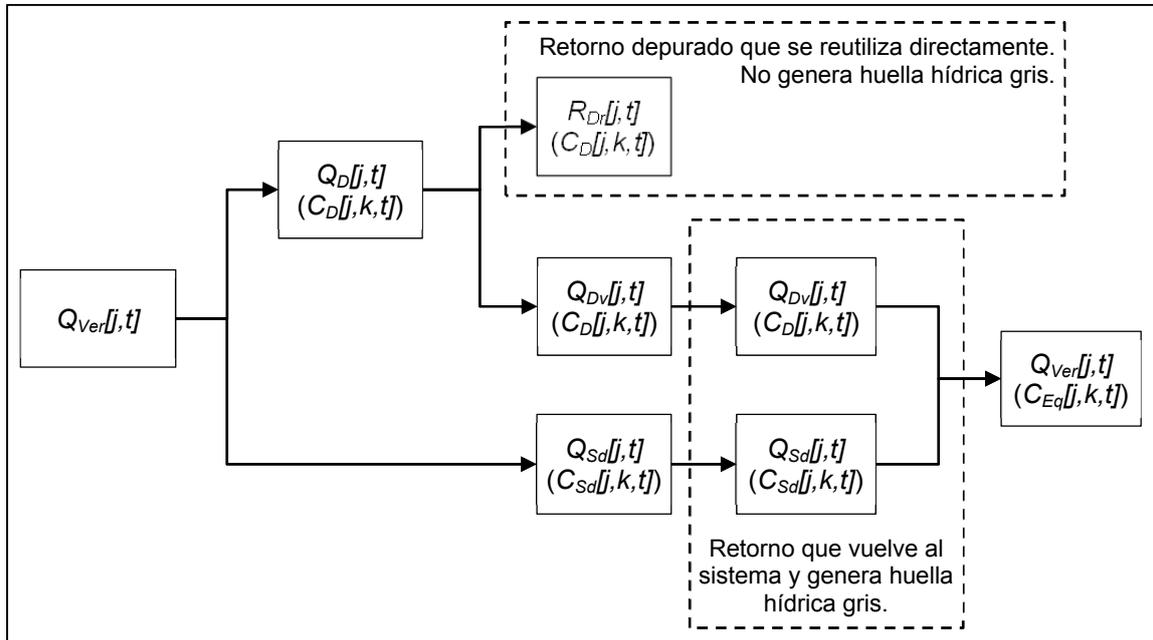


Fig. 2. Esquema de cálculo de la C_{Eq} de un contaminante k .

Siguiendo el esquema de la **Fig. 2** el valor de la concentración equivalente ($C_{Eq}[j,k,t]$) de un contaminante i en el retorno urbano j se calcula con la siguiente expresión:

$$C_{Eq}[j,k,t] = \frac{R_{Dv}[j,t] \cdot C_D[j,k,t] + R_{Sd}[j,t] \cdot C_{Sd}[j,k,t]}{Q_{Ver}[j,t]} \quad (4)$$

De modo que la huella hídrica gris ($HH_{Gris}[j,x,t]$) para los retornos urbanos afectados por la depuración y la reutilización queda de la siguiente manera:

$$HH_{Gris}[j,x,t] = \max[k] \left[\frac{Q_{Ver}[j,t] (C_{Eq}[j,k,t] - c_{nat}[x,k,t])}{c_{max}[x,k,t] - c_{nat}[x,k,t]} \right] \quad (5)$$

2.2.4 Localización de la huella hídrica gris

La simulación del ciclo hidrológico antropizado proporciona los vertidos presentes en una cuenca hidrográfica en forma de j series mensuales de retornos, y es capaz de ubicarlos en el espacio, asociándolos a las masas de agua que los reciben, diferenciando entre superficiales y subterráneas.

Para el caso de las aguas superficiales, la huella hídrica gris ($HH_{Gris_Sup}[x,t]$) de un tramo fluvial x , en el mes t , es el sumatorio de todas las huellas hídricas grises generadas por los nv vertidos ubicados aguas arriba del punto de salida del tramo de estudio (Eq. (6)). Se asume que los contaminantes permanecen constantes en el cauce fluvial y no se reduce su contenido por procesos bioquímicos en el interior del cauce fluvial. Para las aguas subterráneas, la huella hídrica gris ($HH_{Gris_Sub}[x,t]$) en cada acuífero x , en el mes t ,

simulado es el sumatorio de las huellas hídricas grises generadas por todos los nv vertidos que reciben (Eq. (7)).

$$HH_{Gris_Sup}[x,t] = \sum_{j=1}^{nv} HH_{Gris_Sup}[j,x,t] \quad (6)$$

$$HH_{Gris_Sub}[x,t] = \sum_{j=1}^{nv} HH_{Gris_Sub}[j,x,t] \quad (7)$$

Las expresiones anteriores proporcionan la serie mensual de huellas hídricas grises en cada masa de agua x durante el periodo de simulación del ciclo hidrológico antropizado. Con estos datos es posible presentar diferentes resultados, entre los que se encuentran: el valor medio anual de cada masa de agua x , el valor medio de toda la cuenca hidrográfica, la probabilidad de que un valor de huella hídrica gris supere un valor preestablecido, etc.

3 Caso de Estudio

3.1. Descripción general de la Demarcación Hidrográfica del Segura

La metodología presentada se aplica en la Demarcación Hidrográfica de la Segura, que se encuentra en el sureste de la península Ibérica (**Fig. 3**). Pese a ser una de las cuencas hidrográficas más pequeñas en extensión de toda Europa, en torno a 20.000 km², presenta una de las gestiones más complejas, ya que los recursos hídricos propios no son suficientes para satisfacer todas las demandas que se han venido consolidando en su territorio, principalmente demandas de regadío. Para compensar el déficit de agua de la cuenca hidrográfica, existen dos trasvases, un uso intensivo de las aguas subterráneas, varias desaladoras y reutilización de aguas residuales urbanas depuradas (Grindlay et al., 2009; CHS, 2013a). Sin embargo estas medidas no han sido suficientes para solucionar los graves problemas de calidad presentes en una gran parte de sus masas de agua, tanto superficiales como subterráneas (Grindlay et al., 2011). La cuenca hidrográfica presenta una simulación del ciclo hidrológico compleja y graves problemas de calidad de sus aguas, por lo que su elección está motivada a fin de garantizar la generalidad de la metodología propuesta.



Fig. 3. Localización de la Demarcación Hidrográfica del Segura.

3.2. Escenarios de cálculo planteados

El cálculo de la huella hídrica gris se realiza dentro del marco de la planificación hidrológica, utilizándose como escenarios los mismos que plantea la legislación española en esta materia (BOE, 2008). Los escenarios son 2010, 2015 y 2027. El primero corresponde con la situación actual, el segundo tiene en cuenta los cambios planteados en la gestión a corto plazo, mientras que el tercero representa el escenario futuro previsible a largo plazo. Asimismo, se incluye el escenario del anterior proceso de planificación hidrológica de 1998, con el objeto de contrastar la evolución histórica de este indicador desde dicho año hasta la actualidad.

Para cada uno de los cuatro escenarios se construye una red de flujo con el DSS, utilizándose como inputs los resultados del modelo hidrológico SIMPA, que proporciona series mensuales durante 70 años consecutivos (1940-2010).

El diseño de las redes de flujo de la SERH se basa en la documentación oficial elaborada por el organismo gestor de dicha cuenca (CHS, 1998; MMA, 2001; CHS, 2007; CHS, 2008; CHS, 2013a). Al igual que en otras simulaciones (CHS, 2007; CHS, 2008), las demandas de abastecimiento, turismo e industrial, se modelizan de forma conjunta, denominándose como demandas urbanas. En este trabajo se introducen una serie de novedades respecto a otras modelizaciones previas realizadas, a fin de obtener una simulación del ciclo hidrológico antropizado más completa:

- i) Se consideran todas las demandas existentes.
- ii) Se incluyen los recursos subterráneos y la reutilización de las aguas residuales.
- iii) Se incorporan los recursos provenientes de la desalación en función de las necesidades de las demandas y no como un caudal de entrada constante.
- iv) Se amplía el periodo de simulación hasta el año 2010, ya que el utilizado hasta ahora es de 1940-2005.

Las principales características de cada escenario se muestran en la **Tabla 1**.

		Escenarios de cálculo			
		1998	2010	2015	2027
Requerimientos Ambientales	Q ecológico*	0	0	0	0
	Demanda ambiental	30	31.7	31.7	31.7
Demandas	Abastecimiento/Turismo	221	249	253	297
	Regadío	1.662	1.552	1.530	1.533
	Industrial	27	20	21	29
Recursos Hídricos	Superficiales/ Subterráneos	1.010	1.010	1.010	921***
	Desalación**	0	81	129	334
	Trasvase	337	337	337	300

Tabla 1. Datos de los escenarios introducidos en el SSD (CHS, 2013a). (*) Existen en todos los tramos fluviales excepto en la desembocadura que se considera nulo. (**) Capacidad máxima de desalación. (***) En el escenario 2027 se considera un descenso del 11% de los recursos naturales debido al cambio climático (BOE, 2008).

3.3. Datos de los contaminantes

Para el cálculo de la huella hídrica gris (Eq. (5)) se utiliza el caudal mensual de los retornos (Q_{Ver}) que proporciona la simulación del SERH, y las siguientes concentraciones:

1. La máxima permitida por la legislación (c_{max}) para cada contaminante k .
2. La concentración de los diferentes k contaminantes que se encuentran en los retornos de regadío (c_{eff}) y la equivalente (C_{Eq}) en los vertidos urbanos.
3. La de los k contaminantes que se encuentran en el medio receptor de forma natural (c_{nat}).

3.3.1 Concentración máxima c_{max}

No existe una relación genérica de contaminantes que se tienen que analizar a la hora de calcular la huella hídrica gris en una cuenca hidrográfica. Por lo que ha sido necesario seleccionar los k contaminantes a considerar a partir del listado de concentraciones máximas permitidas (c_{max}) por la legislación española (BOE, 2008) de varias sustancias contaminantes, diferenciando entre aguas subterráneas y aguas superficiales. Con estos datos se establece una primera relación de k contaminantes y el valor de su concentración máxima permitida (**Tabla 2**).

Estas concentraciones máximas se establecen como constantes en el tiempo, teniendo que asumir que la concentración máxima sólo depende de la masa de agua x que recibe el vertido y del contaminante k ($c_{max}[x, k]$). En los casos que sea posible fijar la concentración máxima para cada mes, por ejemplo de forma estacional, se debe tener en cuenta esta variación.

Tras fijar los k contaminantes se busca información relacionada con las concentraciones de dichos contaminantes en los principales vertidos de la cuenca hidrográfica (regadío y urbano). Con la que se obtiene la concentración de los contaminantes en los retornos de regadío (c_{eff}) y la concentración equivalente (C_{Eq}) para los retornos urbanos.

Concentraciones máximas permitidas (BOE, 2008)		
Contaminante (k)	Masas Superficiales	Masas Subterráneas
Oxígeno disuelto	> 5 mg/L	No contemplado (NC)
Tasa de saturación de Oxígeno (TS)	60% < TS < 120%	NC
pH	6 < pH < 9	NC
DBO ₅	< 6 mg/L O ₂	NC
Nitrato	< 25 mg/L NO ₃ ⁻	< 50 mg/L
Amonio	< 1 mg/L NH ₄ ⁺	NC
Fósforo total	< 0,4 mg/L PO ₄ ³⁻	NC
Plaguicidas	NC	60% < TS < 120%
Arsénico	NC	< 10 mg/L
Fluoruro	NC	< 1,5 mg/L

Tabla 2. Concentraciones de contaminantes máximas permitidas en las masas de agua (BOE, 2008).

3.3.2 Concentraciones de contaminantes en los vertidos

3.3.2.1 Retornos de regadío.

En la cuenca hidrográfica del Segura no existe ninguna red de medidas específica para este tipo de retornos, por lo que ha sido necesario recurrir a datos de uno de los pocos trabajos existentes en esta materia, los registrados en la Demarcación Hidrográfica del Ebro y publicados por Dechmi et al. (2013) (Tabla 3).

Entre los datos analizados en dicho estudio, los que tienen un umbral máximo contemplado (**Tabla 2**) son los nitratos (NO₃⁻) y fosfatos (PO₄³⁻). Para el cálculo de la huella hídrica gris de los retornos de regadío que reciben las aguas superficiales se utilizan ambos, mientras que para las aguas subterráneas el único contaminante contemplado son los nitratos, reduciéndose sensiblemente el número de contaminantes en este cálculo. Por otro lado, el estudio de Dechmi et al. (2013) también concluye que, cuanto mayor es el porcentaje de demanda que retorna la concentración de los contaminantes es menor. Es decir, para una demanda con un % de retorno elevado la concentración en el efluente suele ser menor ya que, a igual cantidad de contaminante éste se encuentra más diluido. Este criterio es el que se utiliza a la hora de asignar las concentraciones de contaminantes (C_{eff}) entre los retornos de regadío. El porcentaje de retorno es diferente en cada demanda al depender éste del sistema de irrigación predominante en la zona representada por dicha demanda: los que tienen un retorno igual o menor al 5% se le asigna la concentración máxima ($C_{eff-max}$), los que lo tienen entre el 5% y el 10% la concentración media ($C_{eff-med}$) y en los que es superior al 10% la concentración mínima ($C_{eff-min}$) (**Tabla 3**).

	Contaminante	C_{eff}		
		$C_{eff-max}$ (mg/l)	$C_{eff-med}$ (mg/l)	$C_{eff-min}$ (mg/l)
Retornos	NO_3^-	173	67	28
Regadío	PO_4^{3-}	1,180	0,261	0,008

Tabla 3. Concentraciones de contaminantes en los retornos de regadío (Dechmi et al., 2013).

Asimismo, como los datos del estudio de Dechmi et al. (2013) tienen una variabilidad muy alta, desde 28 mg/l hasta 173 mg/l en los nitratos, ha sido necesario contrastarlos con los de otros autores, lo que revela la existencia de una alta incertidumbre a la hora de fijar un valor en las concentraciones de los retornos de regadíos (Barros et al., 2012; Causape et al., 2006). Para analizar esta incertidumbre, al final de la evaluación de la huella hídrica gris para el estado actual se realiza un análisis de sensibilidad de estos parámetros con el fin de estudiar la robustez de los resultados obtenidos.

Con la información disponible no es posible determinar la variación temporal de la concentración de los k contaminantes en los retornos de regadío, por lo que se establece en función del tipo de contaminante k y de la masa de agua x .

3.3.2.2 Retornos urbanos.

Para este tipo de vertidos se calcula la concentración equivalente (C_{Eq}) a partir de: el caudal total que retorna (R_{Sd}), el caudal que se depura (R_D), el caudal depurado que se reutiliza de forma directa (R_{Dr}), y las concentraciones de los contaminantes en los retornos depurados (C_D) y sin depurar (C_{Sd}).

Los valores del caudal total depurado (R_D), del caudal depurado que se reutiliza (R_{Dr}), y del volumen de retorno urbano vertido sin depurar (R_{Sd}), se conocen de forma global para toda la cuenca hidrográfica, no habiendo sido posible determinar estos porcentajes para cada vertido (**Tabla 4**). Por tanto se determina una concentración equivalente (C_{Eq}) media de cada contaminante k (CHS, 1998; CHS, 2013a) a partir de los valores medios de depuración, reutilización, y vertido sin depurar que se obtienen con los datos de la Tabla 4. Los valores para 1998 y 2010 son valores estimados con datos históricos, mientras que para los años 2015 y 2027 son valores determinados mediante proyecciones a futuro.

Año	Retornos totales (Q_{Ver})	Retornos depurados (R_D)	Retornos reutilizados (R_{Dr})	Retorno depurado vertido (R_{Dv})	Retorno vertido sin depurar (R_{Sd})
1998	126,0	86,0	51,0	35,0	40,0
2010	145,1	143,6	82,6	61,0	1,5
2015	146,5	145,0	83,4	61,6	1,5
2027	171,1	169,4	97,4	67,0	1,7

Tabla 4. Volúmenes (hm^3) de retornos urbanos y volúmenes depurados (CHS, 1998; CHS, 2013a)

Como la relación entre los diferentes caudales es constante en el tiempo, las concentraciones en cada uno de estos vertidos se asumen constantes para cada escenario. De los vertidos urbanos se tiene información de tres contaminantes que se

encuentran en **Tabla 2**, nitratos (NO_3^-), fosfatos (PO_4^{3-}) y demanda biológica de oxígeno (DBO_5). Para los vertidos sobre aguas superficiales se utilizan los tres contaminantes, mientras que para las subterráneas solamente se utilizan los nitratos (**Tabla 2**). Las distintas concentraciones de estos contaminantes que se encuentran en los retornos sin depurar (**Tabla 5**), así como los porcentajes de depuración (**Tabla 6**), proceden de las memorias de explotación de las empresas gestoras de las depuradoras (ESAMUR, 2007; ESAMUR, 2013; EPSAR, 2013).

Concentraciones del efluente sin depurar (C_{sd}), (mg/l)			
Año	DBO_5 (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	PO_4^{3-} (mg/l)
1998	557	80	13
2010	311	80	13
2015	325	80	13
2027	325	80	13

Tabla 5. Concentraciones de contaminantes en los efluentes de las depuradoras para los escenarios.

Año	Tasas de eliminación (%) de contaminantes de las depuradoras			Concentraciones del efluente depurado (C_D), (mg/l)		
	DBO_5	NO_3^-	PO_4^{3-}	DBO_5	NO_3^-	PO_4^{3-}
1998	86%	57%	46%	78,0	34,4	7,0
2010	96%	64%	52%	12,4	28,8	6,2
2015	99%	67%	54%	3,3	26,4	6,0
2027	100%	75%	60%	0,0	20,0	5,2

Tabla 6 Grado de depuración en la DHS: actual y futura (ESAMUR, 2007; ESAMUR, 2013; EPSAR, 2013).

Una vez definidas todas las variables implicadas en el cálculo de la concentración equivalente de cada contaminante (C_{Eq}), se aplica la Eq. (4) y se obtienen los valores de las C_{Eq} (**Tabla 7**) que se utilizan junto con los retornos de la SERH (Q_{Ver}).

Concentraciones equivalentes del efluente (C_{Eq}), (mg/l)			
Año	DBO_5	NO_3^-	PO_4^{3-}
1998	198,5	35,0	6,1
2010	8,4	12,9	2,8
2015	4,7	11,9	2,6
2027	3,2	9,2	2,3

Tabla 7. Concentraciones equivalentes (C_{Eq}) en los retornos urbanos.

Uno de los objetivos de este estudio, además de determinar la huella hídrica gris de una cuenca hidrográfica, es analizar la influencia que sobre este indicador tiene la depuración

y reutilización de los retornos urbanos. Para ello, se determinan las concentraciones equivalentes (**Tabla 8**) de dos escenarios alternativos que también se simulan: uno en el que no existiese reutilización (se asume R_{Dr} nulo), y otro en el que no hay depuración (R_D nulo).

Año	Concentraciones del efluente (C_{Eq} , mg/l), si no hubiera reutilización directa			Concentraciones del efluente (C_{Eq} , mg/l), si no hubiera depuración		
	DBO ₅	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	DBO ₅	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻
1998	230,0	48,9	8,9	331,5	47,6	6,1
2010	15,5	29,3	6,3	134,0	34,5	5,6
2015	6,5	26,9	6,1	140,0	34,5	5,6
2027	3,2	20,6	5,3	140,0	34,5	5,6

Tabla 8. Concentraciones equivalentes para los escenarios sin depuración y sin reutilización.

3.3.2 Concentraciones naturales (c_{nat}) de los contaminantes en las masas de agua

La calidad de la mayoría de las masas de agua de la cuenca hidrográfica del Segura se encuentra alterada por acciones antrópicas y los controles de calidad comenzaron cuando las masas de agua ya se encontraban modificadas. Por estos motivos se recurre a mediciones de concentraciones en la zona de cabecera, ya que en esta zona prácticamente no existen retornos y se pueden considerar que se encuentran en estado natural.

Para las masas de agua superficiales las mediciones de las concentraciones de DBO₅, nitratos y fosfatos son cercanos a cero excepto en momentos puntuales (CHS, 2013b), por lo que se establecen valores nulos para las concentraciones naturales de estos contaminantes (**Tabla 9**). Mientras, para las aguas subterráneas se considera apropiado tomar como referencia las concentraciones naturales de los acuíferos más inalterados de la cabecera. La red de medidas de la CHS (2013c) indica que existe una pequeña concentración natural (c_{nat}) de nitratos (Gu et al., 2013a) en la mayoría de acuíferos en estas zonas cuya media es de 3 mg/l, siendo éste el valor que se emplea en el cálculo (**Tabla 9**).

	Contaminante	Concentración natural (C_{nat})
Aguas Superficiales	DBO ₅ (mg/l)	0
	NO ₃ ⁻ (mg/l)	0
	PO ₄ ³⁻ (mg/l)	0
Aguas Subterráneas	NO ₃ ⁻	3

Tabla 9. Concentraciones naturales de los contaminantes en las masas de agua (CHS, 2013c).

4 Resultados y discusión

4.1. Valor de la huella hídrica gris actual

En primer lugar se presentan los resultados de la huella hídrica gris para el escenario actual 2010 (**Tabla 10**) según el tipo de vertido y diferenciando entre las masas de aguas superficiales (HH_{Gris_Sup}) de las subterráneas (HH_{Gris_Sub}).

HH_{Gris} ($hm^3/año$)	Retornos de regadío	Retornos urbanos	Total
HH_{Gris_Sup}	61	965	1.027
HH_{Gris_Sub}	121	2	123
HH_{Gris_Total}	183	967	1.150

Tabla 10. Huella hídrica gris en el escenario de 2010

La huella hídrica gris media generada por los vertidos urbanos es de $967\text{ hm}^3/año$, mientras que la que se produce por los retornos de regadío es de $183\text{ hm}^3/año$. Estos datos revelan la importancia que los retornos urbanos tienen en el cálculo de la huella hídrica gris, incluso en una cuenca hidrográfica como la del Segura, en la que la demanda de regadío es seis veces superior a la urbana.

Respecto al destino del vertido, se observa que huella hídrica gris en las masas de aguas superficiales se debe esencialmente a los retornos urbanos, mientras que los regadíos lo son en las subterráneas. En conjunto, la huella hídrica gris alcanza el valor de $1.150\text{ hm}^3/año$, que es un valor superior a todos los recursos hídricos de la cuenca en régimen natural (**Tabla 10**).

Los resultados indican que de los k contaminantes estudiados, los nitratos son los responsables de la huella hídrica gris generada por el regadío y por los vertidos urbanos sobre las aguas subterráneas. Mientras que la originada por los urbanos en las aguas superficiales se debe a los fosfatos, al ser el contaminante que mayor volumen necesita para ser diluido.

Estadísticos básicos	HH_{Gris}	Unidades
Media	1.150	$hm^3/año$
Máximo	1.156	
Mínimo	1.095	
Rango	61	
Desviación típica	11	
Coefficiente de variación	0,01	-
n	70	año

Tabla 11. Estadísticos básicos de la huella hídrica gris de HHT.

Como se ha calculado la huella hídrica gris para los 70 años de la simulación del ciclo hidrológico antropizado, ha sido posible determinar los estadísticos básicos de esta variable así como el rango de variación, que ha resultado de $61\text{ hm}^3/año$ (**Tabla 11**).

Gracias a la metodología utilizada ha sido posible asignar a cada masa de agua el valor de huella hídrica gris que se genera en cada una, diferenciando entre aguas superficiales (**Fig. 4, Tabla 12**) y subterráneas (**Fig. 5**).

Tramo fluvial	HH_{Gris} (hm³/año)
Río Segura desde Cenajo hasta confluencia con el río Mundo	0,0
Río Segura desde confluencia con el río Mundo hasta confluencia con el río Quípar	16,4
Río Segura desde confluencia con río Quípar hasta azud de Ojós	49,1
Río Segura desde azud de Ojós a la Contraparada	60,7
Río Segura, entre Contraparada y Reguerón	68,7
Río Segura, desde Reguerón a Beniel	770,4
Río Segura, desde Beniel a San Antonio	1027,1
Río Segura, desde San Antonio al Mar	1027,1
Río Mundo desde el Talave hasta Camarillas	32,7
Río Mundo desde Camarillas hasta la confluencia con el río Segura	32,7
Ríos Quípar-Argos-Alhárabe	11,6
Río Mula	8,1
Río Guadalentín desde el embalse de Puentes hasta Lorca	74,1
Río Guadalentín desde Lorca hasta el Paretón	74,1
Río Guadalentín desde el Paretón hasta el Reguerón.	74,1

Tabla 12. Huella hídrica gris media anual asignada a cada tramo fluvial.

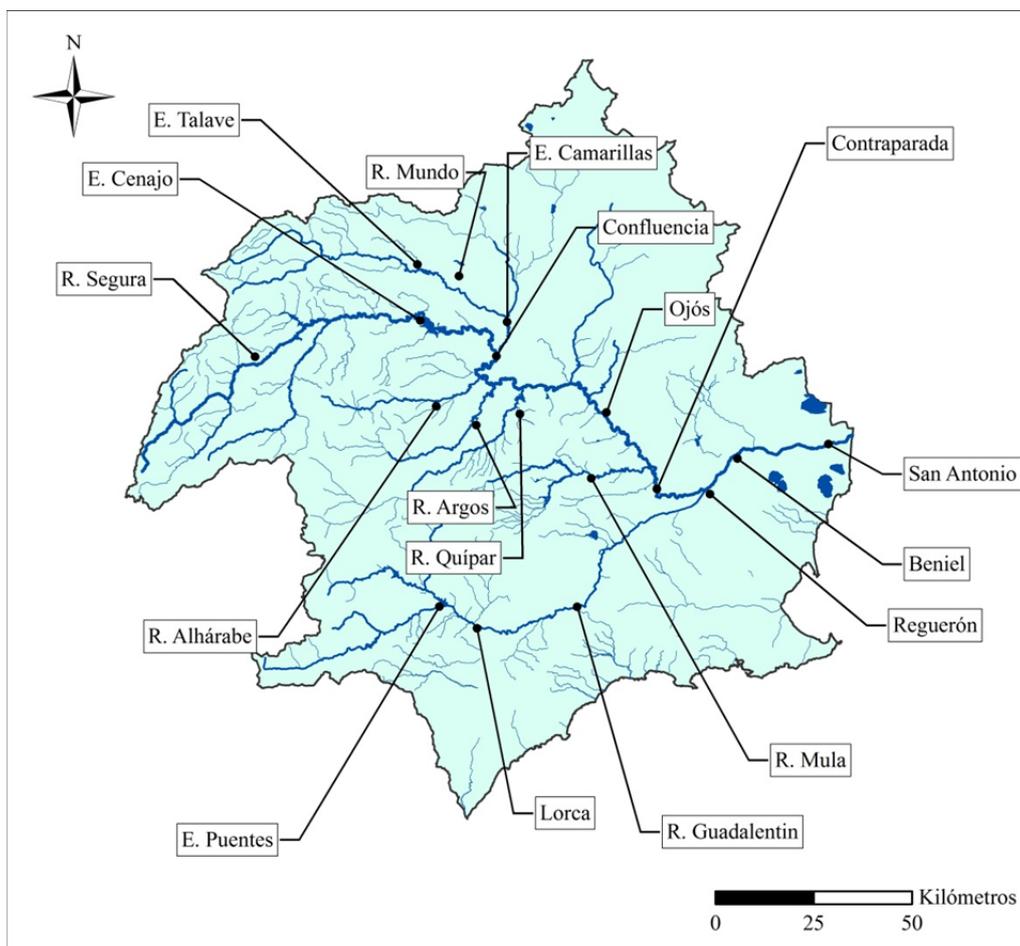


Fig. 4. Localización de los tramos fluviales estudiados en la Demarcación Hidrográfica del Segura.

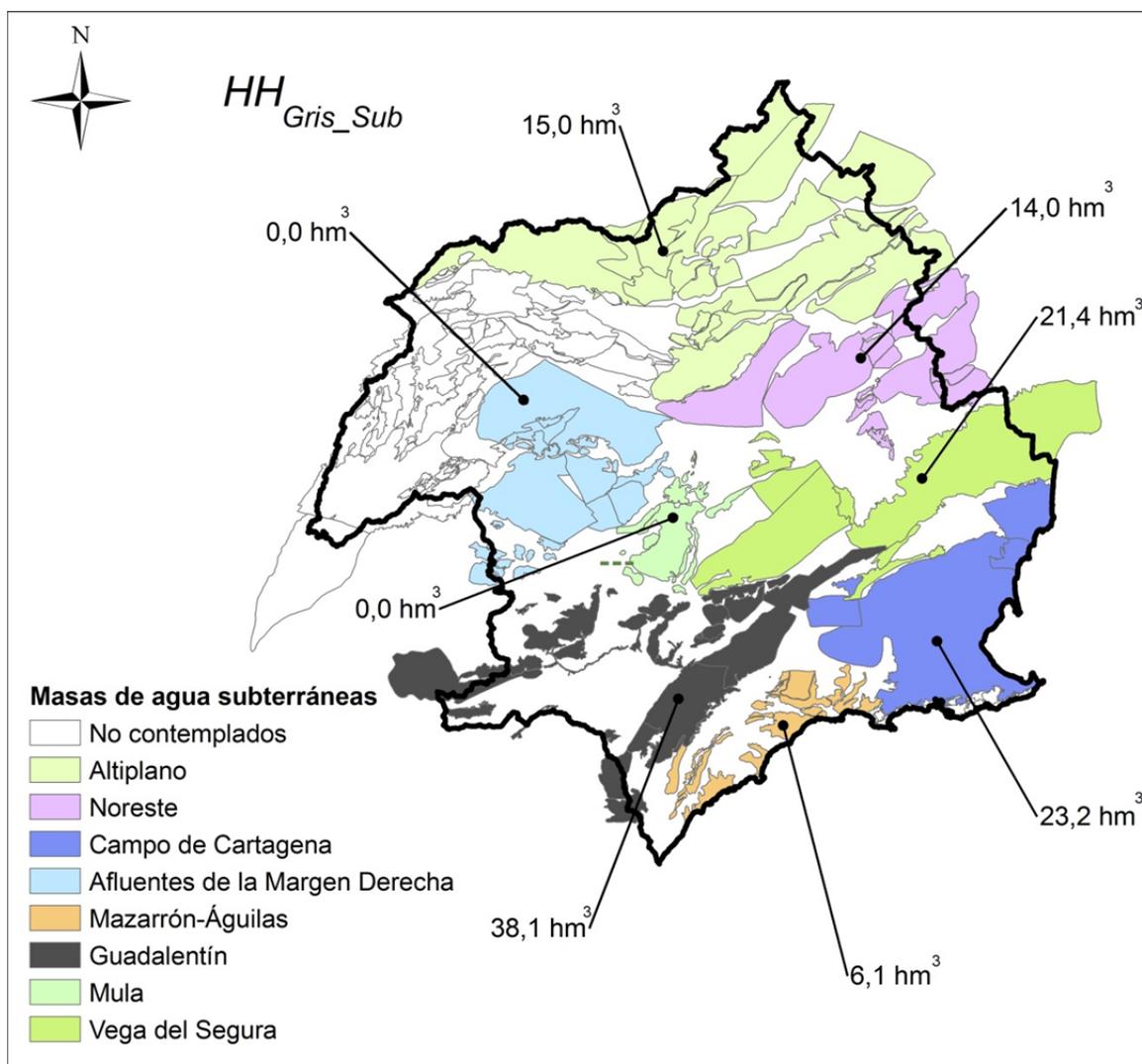


Fig. 5. Localización de la huella hídrica gris subterránea de la Demarcación Hidrográfica del Segura.

La huella hídrica gris superficial se concentra en la desembocadura del río Segura, ya que es el tramo fluvial que recoge todos los vertidos superficiales. Por otro lado, las aguas subterráneas con mayor huella hídrica son las zonas costeras y la vega del Segura, donde se ubican los principales regadíos de la zona de estudio.

4.2. Análisis de sensibilidad de la concentración de los efluentes en los retornos de regadío

En el cálculo de la huella hídrica gris del escenario actual las concentraciones de nitratos en los retornos de regadío se han establecido como fijas, utilizando tres concentraciones según el % de retorno de cada demanda ($C_{eff-max}$, $C_{eff-med}$, $C_{eff-min}$). Como se indica anteriormente existe una incertidumbre asociada a estos datos, siendo oportuno realizar un análisis de sensibilidad. La variación de las concentraciones $C_{eff-max}$, $C_{eff-med}$ y $C_{eff-min}$ se

establece desde cero hasta un valor doble al fijado previamente, es decir una variación de $\pm 100\%$ (**Tabla 13**).

Parámetro	$C_{\text{eff-max}}$ (mg/l)	$C_{\text{eff-med}}$ (mg/l)	$C_{\text{eff-min}}$ (mg/l)
Max (NO_3^-)	346	134	56
Min (NO_3^-)	0	0	0

Tabla 13. Límites de las concentraciones utilizadas en el análisis de sensibilidad.

El cálculo de la huella hídrica gris bajo estos supuestos proporciona una variación de $\pm 187 \text{ hm}^3/\text{año}$ (**Fig. 6**), que en términos relativos respecto a la huella hídrica total supone un $\pm 16\%$. De lo que se deduce que el valor de la concentración de nitratos utilizada en los retornos de regadíos no resulta tan determinante como la que se pueda emplear en los vertidos urbanos.

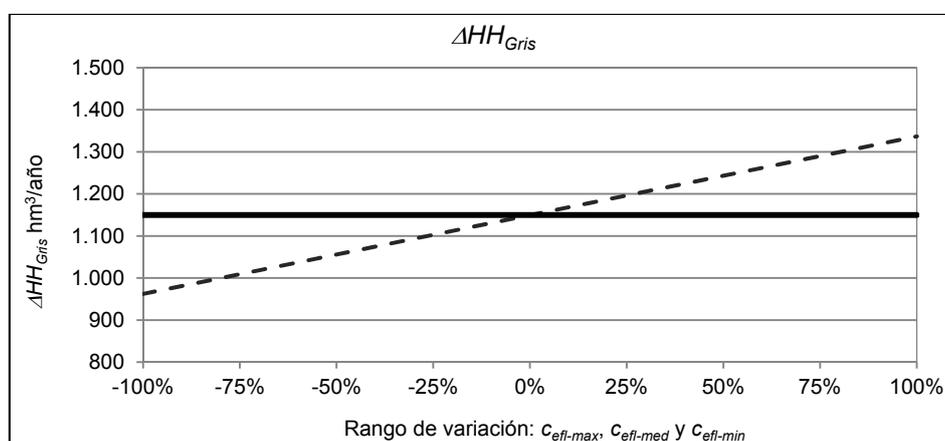


Fig. 6. ΔHH_{Gris} por la variación de la concentración de nitratos en los retornos de regadío.

4.3. Evolución histórica y previsión futura del valor de la huella hídrica gris

Con objeto de analizar la influencia que tienen las diferentes actuaciones que se han llevado a cabo, o que se esperan realizar, en materia de planificación hidrológica sobre el valor de la huella hídrica gris en la cuenca hidrográfica del Segura, se determina el valor de este indicador para los cuatro escenarios presentados previamente.

Los resultados obtenidos indican que el plan de saneamiento y depuración llevado a cabo en esa cuenca hidrográfica durante los últimos 15 años (ESAMUR, 2013) ha dado un resultado más que satisfactorio, ya que se ha reducido el valor de la huella hídrica gris desde $4.437 \text{ hm}^3/\text{año}$ para el año 1998 hasta $1.150 \text{ hm}^3/\text{año}$. Sin embargo, las previsiones futuras indican que la reducción de la huella hídrica gris no sólo se va a quedar estancada, sino que hay perspectivas de que aumente levemente el futuro (**Fig. 7**). Los principales factores responsables de que no se vaya a disminuir el valor de la huella hídrica gris ni a medio (2015) ni a largo plazo (2027) son el aumento de la demanda urbana y la gran dificultad de mejorar los ratios de depuración y reutilización actualmente alcanzados (**Tabla 6** y **Tabla 7**).

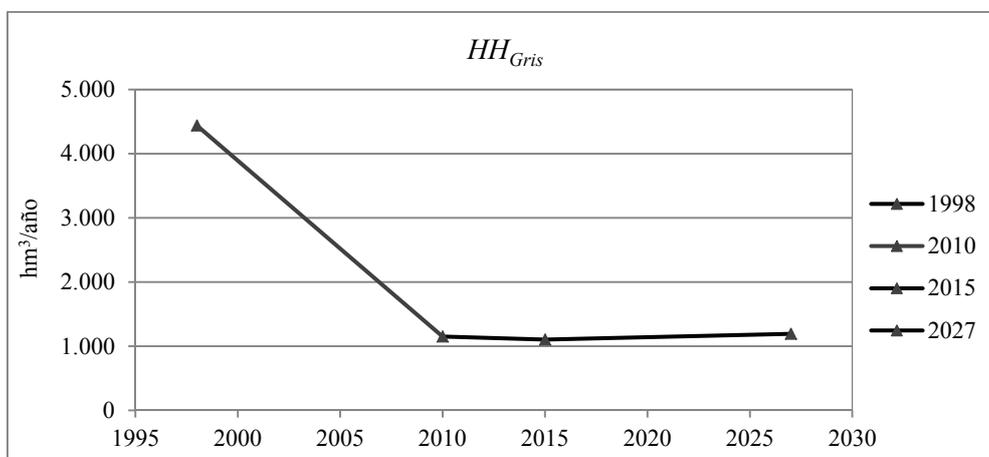


Fig. 7. Valores de la HH_{Gris} para los diferentes escenarios de cálculo.

4.4. Influencia de la depuración y de la reutilización en la huella hídrica gris

Como se acaba de reseñar, la depuración de los retornos urbanos y la reutilización directa para su uso en regadío son dos actuaciones que han reducido de forma considerable la contaminación que reciben las masas de agua superficiales y subterráneas, disminuyendo sensiblemente la huella hídrica gris entre los escenarios 1998 y 2010 (Fig. 7).

Para cuantificar la importancia de cada una de estas actuaciones por separado se vuelven a simular los tres escenarios del proceso de planificación actual (2010, 2015 y 2027) pero, en primer lugar sin tener en cuenta la depuración y, en segundo lugar sin considerar la reutilización. Estas dos modificaciones se introducen en la simulación cambiando el valor de la concentración equivalente (C_{Eq}) en los vertidos urbanos (Tabla 8). Una vez calculadas los valores de las nuevas huellas hídricas bajo estos dos nuevos supuestos se comparan con las determinadas previamente (Fig. 7), obteniéndose la variación de la que es responsable cada actuación (Fig. 8).

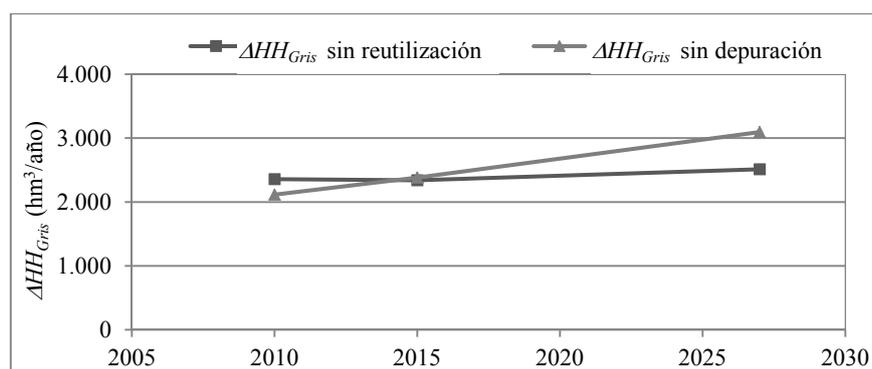


Fig. 8. ΔHH_{Gris} sin reutilización y sin depuración.

Esta comparativa pone de manifiesto que la depuración ha hecho disminuir la huella hídrica gris en unos 2.000 $hm^3/año$ para el escenario actual, y que la hará disminuir en 2.400 $hm^3/año$ para el año 2015 y en más de 3.000 $hm^3/año$ para 2027. El descenso en

los escenarios de 2015 y 2027 es mayor debido a que la demanda urbana prevista también lo es, y por tanto, el retorno y la eliminación de contaminantes por la depuración también lo son.

Por otro lado, la reutilización representa un descenso en la huella hídrica gris de unos 2.400 hm³/año para 2010 y 2015, y de unos 2.500 hm³/año en 2027. Estos resultados son más estables que los anteriores porque la reutilización no puede aumentar en los años 2015 y 2027, ya que vertidos urbanos depurados en esta cuenca hidrográfica son necesarios para el mantenimiento de los caudales ecológicos (CHS, 2013).

Conjuntamente, producen un descenso de la huella hídrica gris de más de 4.400 hm³/año para el estado actual, de 4.700 hm³/año en 2015, y de unos 5.600 hm³/año para el escenario de 2027.

5 Conclusiones

La combinación del ciclo hidrológico antropizado con la formación estándar de la huella hídrica gris modificada en este estudio ha posibilitado el cálculo de este indicador en un cuenca hidrográfica de forma completa, siendo generalmente soslayada en otros estudios por falta de información (Zeng et al., 2012). Los resultados obtenidos tienen en cuenta todas las singularidades que se pueden encontrar en la gestión de una cuenca hidrográfica, como son la regulación de las aguas superficiales por parte de los embalses, la escasez de recursos, la desalación, el uso de las aguas subterráneas, la reutilización, la depuración, etc.

La propuesta metodológica mejora la que actualmente se viene utilizando. Considera que un efluente puede tener varios contaminantes, modificación que coincide con recomendaciones publicadas recientemente sobre el cálculo de este indicador (Wang & Wu, 2014). Se introducen y se evalúan dos conceptos novedosos en el ámbito de la huella hídrica gris: la depuración y la reutilización. Gracias al uso del ciclo hidrológico antropizado, es la primera vez que se relaciona el valor de la huella hídrica gris con la masa de agua en la que se genera, diferenciando incluso entre aguas superficiales y subterráneas. Además, distingue el valor de la huella hídrica gris que se debe a retornos urbanos del que se debe a regadíos. Por último, permite establecer escenarios futuros en los que analizar cómo se comportará el valor de la huella hídrica gris de la cuenca hidrográfica si se realizasen nuevas actuaciones para reducir su valor.

El valor de la huella hídrica gris medio actual para toda la cuenca hidrográfica del Segura (1.150 hm³/año) resulta superior a todos sus recursos hídricos (1.010 hm³/año), a pesar de que su valor actual se ha reducido en un 75% desde el año 1998, ya que las tasas de depuración alcanzadas son del 99% y las de reutilización de vertidos urbanos depurados del 60%. Este resultado revela la dificultad de seguir reduciendo la huella hídrica gris en un futuro y demuestra la importancia del impacto que los vertidos urbanos tienen sobre los recursos hídricos naturales, incluso en aquellas cuencas en las que existe una fuerte política de depuración de los vertidos urbanos con el objetivo de que puedan ser reutilizados.

Referencias

- Andreu J. 1992. OPTIGES Model for Management Optimization of Water Resources Schemes. User's Manual. Version 2.0. Valencia, España.
- Andreu J, Capilla J & E Sanchis. 1996. AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, 177(3-4): 269-291.
- Barros R, Isidoro D & R Araguees. 2012. Irrigation management, nitrogen fertilization and nitrogen losses in the return flows of La Violada irrigation district (Spain). *Agriculture Ecosystems & Environment*, 155: 161-171.
- BOE. 2008. Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Boletín Oficial del Estado. nº 71. pp. 12820-12821.
- Causape J, Quilez D & R Araguees. 2006. Irrigation efficiency and quality of irrigation return flows in the Ebro River Basin: An overview. *Environmental Monitoring and Assessment*, 117(1-3): 451-461.
- CE. 2000. Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Diario Oficial de la Unión Europea nº L 327:1-73, de 22 de diciembre de 2000. Bruselas.
- CHS. 1998. Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura. Confederación Hidrográfica del Segura. Ministerio de Medio Ambiente.
- CHS. 2007. Plan de Actuación en Situaciones de Alerta y Eventual Sequía en la Cuenca del Segura. Confederación Hidrográfica del Segura. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- CHS. 2008. Esquema provisional de Temas Importantes de la Demarcación Hidrográfica del Segura. Confederación Hidrográfica del Segura. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- CHS. 2013a. Borrador del Plan de Cuenca de la Demarcación del Segura. Confederación Hidrográfica del Segura. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- CHS. 2013b. Web de la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS). 3. Disponible en <http://www.chsegura.es/chs/cuenca/redesdecontrol/calidadenaguassuperficiales/> (accedido en junio de 2013).
- CHS. 2013c. Web de la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS). Disponible <https://www.chsegura.es/chs/cuenca/redesdecontrol/calidadenaguassubterranas/> (accedido en junio de 2013).
- CHS. 2014. Web de la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS). Disponible en <http://www.chsegura.es/chs/cuenca/resumendedatosbasicos/recursoshidricos/trasvaseTajoSegura.html> (accedido en enero de 2014).
- de Miguel A. 2013. La huella hídrica como indicador de presiones: aplicación a la cuenca del Duero y al sector porcino español. Universidad de Alcalá. Madrid.

- Dechmi F, Claverís-Laborda I, Balcells-Oliván M & D Isidoro-Ramírez. 2013. La calidad de los retornos de riego en Riegos del Alto Aragón (Huesca, España). XXXI Congreso Nacional de Riegos, Orhiuela, Alicante, 18 a 20 de Junio de 2013. Disponible en <http://hdl.handle.net/10532/2311>
- EPSAR. 2013. Memoria de Gestión 2011. Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana. Conselleria d'Agricultura, Pesca, Alimentació i Aigua. Generalitat Valenciana. Disponible en <http://www.epsar.gva.es/sanejament/quienes-somos/memoria-presupuestos.aspx>
- ESAMUR. 2007. Memoria de explotación 2007. Entidad de Saneamiento y Depuración de la Región de Murcia. Conserjería de Agricultura y Agua. Región de Murcia.
- ESAMUR. 2013. Web de ESAMUR. Disponible en http://esamur.com/index.php?option=com_content&view=article&id=62&Itemid=54 (accedido en enero de 2013).
- Estrela T & L Quintas. 1996. A distributed hydrological model for water resources assessment in large basins. Rivertech '96 - 1st International Conference on New/Emerging Concepts for Rivers, Proceedings, Vols 1 and 2: Celebrating the Twenty-Fifth Anniversary of Iwra: 861-868.
- Fulton J, Cooley H & PH Gleick. 2014. Water Footprint Outcomes and Policy Relevance Change with Scale Considered: Evidence from California. *Water Resources Management*, 28(11): 3637-3649.
- Fundación Mapfre. 2011. Huella hídrica, desarrollo y sostenibilidad en España. Fundación Mapfre.
- Grindlay AL, Zamorano M, Rodríguez MI, Molero E & MA Urrea. 2009. Territorial transformation and water utilization: hydrological planning scenarios in the Segura river basin. *Sustainable Development and Planning Iv*, Vols 1 & 2, 120.
- Grindlay AL, Zamorano M, Rodríguez MI, Molero E & MA Urrea. 2011. Implementation of the European Water Framework Directive: Integration of hydrological and regional planning at the Segura River Basin, southeast Spain. *Land Use Policy*, 28(1): 242-256.
- Gu B, Ge Y, Chang SX, Luo W & J Chang. 2013b. Nitrate in groundwater of China: Sources and driving forces. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 23(5): 1112-1121.
- Hoekstra AY. 2003. Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Delft, Holanda, 12–13 December 2002, Value of Water Research Report Series No.12, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands. www.waterfootprint.org/Reports/Report12.pdf
- Hoekstra AY, Chapagain AK. 2008. *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources*. Blackwell Publishing, Oxford, UK.
- Hoekstra AY, Chapagain, AK, Aldaya MM & MM Mekonnen. 2011. *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Earthscan, London.

- Liu C, Kroeze C, Hoekstra AY & PW Gerbens-Leenes. 2012. Past and future trends in grey water footprints of anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to mayor world rivers. *Ecological indicators*. 18: 42-29
- MMA. 2001. Plan Hidrológico Nacional. Volumen 3: Análisis de los sistemas hidráulicos. Ministerio de Medio Ambiente.
- Montalván-Estrada A, Martínez-Luzardo F, Veitia-Rodríguez E, Brígido-Flores O & Y Caparrós-Cubeña. 2010. Huella hídrica gris en industrias alimenticias camagüeyanas. *Revista cubana química*. Vol, XXII, 2: 44-50.
- Mouelhi S, Michel C, Perrin C & V Andreassian. 2006b. Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318(1-4): 200-214.
- Pellicer-Martínez F & JM Martínez-Paz. 2014. Contrast and Transferability of parameters of lumped water balance models in the Segura River Basin (Spain). *Water and environment journal*. doi:10.1111/wej.12091
- Témez JR, 1977. Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección General de Carreteras. MOPU. Madrid.
- Thaler S, Zessner M, De Lis FB, Kreuzinger N & R Fehringer. 2012. Considerations on methodological challenges for water footprint calculations. *Water Science and Technology*, 65(7): 1258-1264.
- Wang L, Wu X. 2014. Careful considerations when reporting and evaluating the grey water footprint of products. *Ecological Indicators*, 41: 131-132.
- Zeng Z, Liu J, Koeneman PH, Zarate E & AY Hoekstra. 2012. Assessing water footprint at river basin level: a case study for the Heihe River Basin in northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8): 2771-2781.
- van Oel PR, Mekonnen MM & AY Hoekstra. 2009. The external water footprint of the Netherlands: Geographically-explicit quantification and impact assessment. *Ecological Economics*, 69(1): 82-92.