

¿Están alterando las estaciones depuradoras de aguas residuales nuestros ríos?

Are wastewater treatment plants modifying our rivers?

Pérez Andrés, N.¹; Martínez Santa-María, C.^{1*}; Fernández Yuste, J.A.¹

*¹E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio natural.
Universidad Politécnica de Madrid.*

Autor para correspondencia: carolina.martinez@upm.es

Resumen

Se presenta una metodología para caracterizar la alteración hidrológica debida a las EDAR a partir de datos de caudales medios diarios obtenidos de la Red Oficial de Estaciones de Aforo. Como indicadores de alteración hidrológica se utilizan: i) los ratios propuestos por el MAPAMA, ii) los resultados del software IAHRIS y iii) nuevos ratios a escalas mensual y estacional propuestos por los autores de este estudio. Como ejemplos de aplicación se presentan tres casos en la Confederación Hidrográfica del Tajo: EDAR Sur en el río Manzanares, EDAR El Chaparral en el río Guadarrama y EDAR Arroyo Culebro Cuenca Baja en el Arroyo Culebro. Los casos analizados reflejan: (i) un valor de 0,3 se refrenda como umbral de alteración significativa en todos los ratios; ii) en tramos intensamente alterados es difícil diferenciar el efecto de las depuradoras del resto de perturbaciones; iii) en tramos sólo afectados por EDARs la alteración se manifiesta con más intensidad en los períodos secos, cuando los caudales mínimos pueden llegar a experimentar incrementos del orden del 130%. En otros casos se pierde el carácter de río estacional al desaparecer los períodos de flujo cero; iv) en tramos con cuantías importantes de vertidos se han observado incrementos de hasta 14 veces en las aportaciones anuales y 20 veces en las mensuales.

Palabras clave: depuración de aguas, impacto fluvial, hidrología urbana, caudales.

Abstract

A methodology is presented to characterize the hydrological alteration due to wastewater treatment plant (WWTP) from data of daily average flows obtained from the Official Network of Stream gauges. As indicators of hydrological alteration, the following are used: i) the ratios proposed by the MAPAMA, ii) the results of the IAHRIS software, and iii) new ratios at monthly and seasonal scales proposed by the authors of this study. As examples of application, three cases of the Community of Madrid are presented: Sur WWTP in the Manzanares River, El Chaparral WWTP in the Guadarrama River and Arroyo Culebro Cuenca Baja WWTP in the Culebro Stream. The analyzed cases reflect: (i) a value of 0.3 is endorsed as a significant alteration threshold in all the ratios; ii) in intensely altered sections it is difficult to differentiate the effect of the WWTP from the rest of the disturbances; iii) in sections only affected by WWTPs, the alteration is more pronounced in dry periods, when minimum flows can reach increases of the order of 130%. In other cases, the character of a seasonal river is lost when the periods of zero flow disappear; iv) in sections with significant amounts of wastewater discharges have been observed increases of up to 14 times in the annual volumes and 20 times in the monthly.

Keywords: wastewater treatment, fluvial impact, urban hydrology, flow.

1. Introducción

Las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) surgieron como respuesta ante la creciente preocupación por la calidad de las aguas, experimentando un gran desarrollo entre los países miembro de la Unión Europea en las últimas tres décadas (Cájigas, 2012). En 2015 operaban en España 2.940 depuradoras, tratando 5.160 hm³ de agua al año (iAgu, 2017). Los efluentes depurados son vertidos a los cauces colindantes, presentando en numerosas ocasiones una elevada capacidad potencial para alterar el funcionamiento natural de los mismos. Hasta ahora se han analizado con sobresaliente atención las repercusiones de estos efluentes sobre la calidad físico-química de los ríos y sobre las comunidades biológicas asociadas. Sin embargo, no se han encontrado referencias que intenten valorar el impacto de estos vertidos sobre el régimen de caudales en sus distintos componentes (valores habituales, avenidas y sequías) y aspectos (magnitud, frecuencia, estacionalidad y variabilidad). Tan sólo puede citarse el reciente protocolo de caracterización hidromorfológica elaborado por el Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA, 2017) donde aparecen especificadas las EDAR como causa potencial de alteración del régimen de caudales.

En este contexto el objetivo del presente trabajo es analizar el impacto de las depuradoras sobre el régimen hidrológico del cauce receptor presentando una metodología de caracterización y su aplicación a varios casos de estudio.

2. Material y métodos

Se han analizado cuatro Confederaciones Hidrográficas (Ebro, Tajo, Júcar y Segura), las cuales comprenden un 39,7% del territorio nacional y el 40,7% de las EDAR del cuestionario 2011 del MAPAMA (967 de 2212 EDAR). Como fuente de datos se ha utilizado el visor del MAPAMA consultándose las siguientes capas- se citan las capas con la denominación que aparecen en el visor-: ortofotos PNOA Máxima Actualidad; demarcaciones hidrográficas (ámbito terrestre); ríos principales (superficie de cuenca >500km²); depuradoras de aguas residuales cuestionario 2011; embalses; estaciones de aforo y aportaciones anuales en régimen natural (SIMPA, 1980/81-2005/06). Los datos de caudal han sido descargados con la aplicación SEDA (Servidor de Datos de Alteración Hidrológica) del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) y completados en ocasiones con datos tomados directamente de la Red Oficial de Estaciones de Aforo.

Fase 1º: Búsqueda y primera selección de EDARs

El estudio parte de la búsqueda exhaustiva y pre-selección de depuradoras (EDAR *X* en *Figura 1*) de más de 10.000 hab-eq. A continuación, se localiza la estación de aforo más cercana aguas abajo de la EDAR (EA *Q* en la *Figura 1*) y se exige a su vez que cumpla las siguientes condiciones:

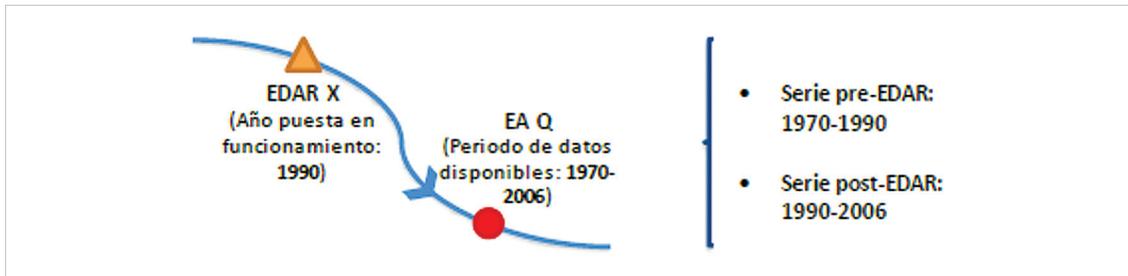


Figura 1. Esquema de la posición relativa entre una EDAR (EDAR X) y su estación de aforo representativa (EA Q). Se presenta un ejemplo de definición de las series hidrológicas pre y post EDAR necesarias para el estudio, que se definen en función de la fecha de puesta en funcionamiento de la EDAR (en el ejemplo, 1990) y del período de datos disponible en la EA (en el ejemplo, 1970-2006).

- Distancia EDAR-EA variable siempre que presenten cuencas homologables.
- Ausencia de perturbaciones entre ambos puntos -embalses, canales de derivación y tributarios de entidad.
- Disponibilidad de al menos 15 años completos de datos para cada período.

Esta última exigencia se explica al considerar que el año de puesta en funcionamiento de la depuradora establece la división del periodo de datos de caudal medio diario disponible en la EA en dos sub-periodos: la serie pre-EDAR, anterior a la apertura de la EDAR y que será considerada como serie de referencia; y la serie post-EDAR, desde esa fecha en adelante, considerada como serie alterada.

Para que los registros obtenidos en la EA sean representativos de los circulantes a la altura de la EDAR, las circunstancias evaluadas en la condición ii) pueden obligar a una corrección de los datos de aforo en función de la superficie de cuenca vertiente, previa comprobación de la homologación de las mismas. Esto implica la semejanza en los factores de precipitación, generación de escorrentía y circulación del flujo. La fórmula que aplica el método es la siguiente:

$$q_{\text{medio diario corregido EDAR}} = q_{\text{medio diario EA}} \cdot Sc_{\text{EDAR}} / Sc_{\text{EA}}$$

Siendo, $q_{\text{medio diario corregido EDAR}}$, el caudal medio diario corregido que fluye a la altura de la EDAR; $q_{\text{medio diario EA}}$, el caudal medio diario registrado por la estación de aforos; Sc_{EDAR} , la superficie de cuenca que vierte a la EDAR; y Sc_{EA} , la superficie de cuenca que vierte a la estación de aforos. Los caudales se expresan en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ y las superficies en km^2 .

Fase 2º: Selección de EDARs con capacidad potencial de alteración

Con las EDARs seleccionadas en la fase anterior se realizó un primer filtrado

descartando aquellas que no tenían capacidad potencial de alterar hidrológicamente al cauce receptor. Dicha capacidad se evaluó mediante el Indicador de Caracterización de la Alteración Hidrológica (ICAH 5) recogido en el Protocolo de Caracterización Hidromorfológica de masas de agua de la categoría Ríos –en adelante PROTOCOLO– (MAPAMA, 2017) y definido como:

$$\text{ICAH 5} = \text{Vertido anual autorizado EDAR/Aportación anual en Rég. Natural}$$

Siendo, *Vertido anual autorizado EDAR* (hm^3), el caudal de vertido autorizado mostrado en la ficha de la EDAR y, *Aportación anual en Rég. Natural* (hm^3), la aportación anual del cauce en el punto de vertido la EDAR estimada con el modelo SIMPA.

Se seleccionaron aquellas depuradoras con un ICAH 5 $>0,30$, siguiendo las recomendaciones del PROTOCOLO, que considera este valor como umbral de capacidad potencial de alteración en la magnitud y estacionalidad de los caudales.

Fase 3º: Procesado de datos y análisis de resultados

Se obtienen finalmente una selección de casos a estudiar con sus respectivas series de datos de aforo no coetáneas (pre y post EDAR). Dichas series son procesadas con el software IAHRIS (Martínez y Fernández, 2010), buscando los resultados de indicadores de alteración en los meses y años más secos, donde se espera que el efecto de los vertidos sea más evidente. Además, se calculan otros dos ratios propuestos también en el PROTOCOLO (ICAH1 e ICAH 5 acumulado):

- $\text{ICAH 5 acumulado} = \Sigma \text{Vertido anual autorizado EDAR} / \text{Aportación anual Rég. Natural}$
- $\text{ICAH 1} = \text{Vol EMB} / \text{AP anual rég. natural}$

Y se calculan también dos nuevos ratios de alteración hidrológica, en este caso a escalas estacional y mensual, propuestos por los autores de este trabajo y definidos como:

- $\text{Ratio estacional } j = (\text{Vertido anual autorizado EDAR}/4) / \Sigma \text{Aportaciones}_{\text{Estación } j} \text{ Rég. pre - EDAR}$
- $\text{Ratio mensual } i = (\text{Vertido anual autorizado EDAR}/12) / \text{Aportaciones}_{\text{mes } i} \text{ Rég. pre - EDAR}$

Siendo: $\Sigma \text{Vertido anual autorizado EDAR}$ (h m^3), la suma de los caudales de vertido autorizado mostrado en las fichas de las EDAR ubicadas aguas arriba del punto de estudio (excluidas las que presentan un gran embalse aguas abajo); *Aportación anual en Rég. Natural* (h m^3) es la aportación anual del cauce en el punto de verti-

do de la EDAR estimada con el modelo SIMPA; $Vol EMB$ ($h m^3$) es el volumen útil del embalse según la ficha del MAPAMA; $\Sigma Aportaciones de la estación j en Rég. pre - EDAR$ ($h m^3$) es el sumatorio de las aportaciones de los meses que componen la estación j en régimen natural obtenidas en el informe de IAHRIS; y $Aportación del mes i en Rég. pre - EDAR$ ($h m^3$) es la aportación del mes i en régimen natural acorde al informe de IAHRIS.

ICAH 5 acumulado es representativo del potencial de afección que tienen el conjunto de EDARs ubicadas aguas arriba de la estación de aforo, mientras que ICAH 1 es representativo de la capacidad de regulación que tiene un embalse (puede calcularse de manera individual o acumulada para el conjunto de embalses ubicados aguas arriba). Siguiendo al PROTOCOLO, valores altos ($>0,3$) de los ICAHS y de los ratios propuestos informan de una alta capacidad potencial de alteración.

3. Resultados y discusión

Las 967 EDARs pertenecientes a las cuatro Confederaciones Hidrográficas (CH) en estudio fueron sometidas al proceso de selección y análisis presentado en el epígrafe anterior. Como resultado de la Fase 1, sólo el 4% (38) de las EDAR analizadas disponía de una EA representativa. Pudo comprobarse que muchas depuradoras vertían a cauces no aforados, y de las existentes en cauces aforados, un elevado porcentaje de las mismas no disponía de EA ubicada aguas abajo, o dicha EA no era representativa al presentarse perturbaciones de entidad entre la EDAR y la EA (canalizaciones, desvíos, tributarios, etc.) que podían contaminar los objetivos de este estudio. Posteriormente se comprobó la disponibilidad de datos de aforo de las EDAR preseleccionadas (*Tabla 1*), resultando que sólo 8 de ellas disponían de un mínimo de 15 años de datos de caudales en los dos periodos (pre y post EDAR). Los casos finalmente disponibles se encontraban en las CH del Tajo y del Ebro. Cinco de ellas pertenecían a la Comunidad de Madrid (EDAR: Sur, Fuente El Saz, Alcalá Oeste, Alcalá Este y El Chaparral) y, las tres restantes, a Cataluña (EDAR: Flix, Aitona-Seròs y Puigcerdà). Finalmente se calculó el potencial de alteración hidrológica a través del indicador ICAH 5, de modo que sólo aquellas que superen el umbral establecido ($ICAH 5 > 0,3$) serán objeto de estudio (*Figura 2*), resultando la EDAR Sur ($ICAH 5 = 1,38$), ubicada en la CH Tajo, y la EDAR de Puigcerdà ($ICAH 5 = 4,15$), situada en la CH Ebro.

Por su carácter singular se han estudiado también las EDAR de El Chaparral en el río Guadarrama (valor más alto del ICAH 5 por debajo del umbral de 0,3) y Arroyo Culebro Cuenca Baja, en el Arroyo Culebro, ambas en la CH Tajo. Los datos más representativos de estas EDARs se recogen en la *Tabla 2*. El procesado de los datos de Puigcerdà mostró ciertas incoherencias, por lo que se descartó su estudio posterior. Los resultados para el resto de casos se comentan a continuación y se resumen en la *Tabla 3*.

Tabla 1. Preselección de EDARs que cumplen los requisitos de ubicación según la fase 1 de la metodología propuesta. Para cada EDAR se recoge la Confederación a la que pertenecen (CH), el municipio y provincia, año de inicio de funcionamiento. Respecto a la estación de aforos (EA) más cercana se indica, su estado, posición relativa (POSIC.) con la EDAR y año de alta. Las EDARs sombreadas disponen de serie de datos de caudales representativas de las situaciones pre y post puesta en funcionamiento.

CH	RÍO	MUNICIPIO, PROVINCIA	EDAR	EDAR AÑO INICIO (1)	EA MÁS CERCANA			
					COD.	EST. (2)	POS. (3)	AÑO ALT.
TAJO	Gallo	Corduente, Guadalajara	Molina de Aragón	2003	3030	A	ABCT	1945
	Mayor	Huete, Cuenca	Huete	2014*	3172	A	ABCT	1965
	Guadarrama	Bargas, Toledo	Recas	sin construir*	3102	A	ABCT	1962
	Alberche	Cazalegas, Toledo	Cazalegas	sin construir	3101	A	ABST	2013
	Ungría	Horche, Guadalajara	Horche	sin construir	3237	A	ABST	1975
	Jarama	Algete, Madrid	Fuente El Saz	1992	3051	A	ABC3T	1913
		Ciempozuelos, Madrid	Soto Gutiérrez	1991	3174	A	AB	2009
	Henares	Alcalá de Henares, Madrid	Alcalá Oeste	1989/2000	3062	A	ABCT	1913
			Alcalá Este	1987	3241	B	ARST	1975
		Guadalajara	Azuqueca de Henares	sin construir*	3063	A	ABCT	2010
	Tajuña	Orusco, Madrid	Conjunta Ambite	2004	3082	A	ABST	1913
	Arr. Culebro	Getafe, Madrid	Cue.Baja Arr. Culebro	2008	3262	B	ABST	1979
	Manzanares	Arganda, Madrid	La Poveda	1991	3053	B	ABST	1912
		Getafe, Madrid	Sur	1983	3177	A	ABCT	1929
					3072	B	ABCT	1912
		Madrid, Madrid	Viveros de La Villa	1983/2001	3178	B	ABST	1966
					3070	A	ARST	1912
		Madrid, Madrid	La China	1950/2009	3176	B	ABST	1965
	3178				B	AR	1966	
	Guadarrama	Villalba, Madrid	El Chaparral	1988	3100	A	ABCT	1962
	Batres, Madrid	Navalcarnero	1993	3103	A	ABST	2010	
Hurdano	Nuñomoral, Cáceres	Nuñomoral	¿?	3235	A	ABCT	1974	
Riv. de Gata	Moraleja, Cáceres	Moraleja	2014	3162	A	ABCT	1971	
EBRO	Ebro	Tauste, Zaragoza	Tauste	2006	9260	A	ABST	1912
	Huerva	Cuarte de Huerva, Zaragoza	Cuarte de Huerva	2003	9216	A	ABST	1976
					9245	B	ARST	sin datos
	Martin	Hijar, Teruel	Abalate de Arzobispo	2000	9014	A	ABST	1912
	Guadalope	Alcañiz, Teruel	Alcañiz	2000	9015	A	ABST	1912
	Ebro	Ascó, Tarragona	Flix	1998	9163	A	ABCT	1982
					9121	B	ABCT	1942
	Sefre	Serós, Lleida	Aitona-Serós	1998	9025	A	ABST	1916
					9021	A	ABST	1921
	Alhama	Fitero, Navarra	Fitero	2013	9185	A	ABST	1976
		Tudela, Navarra	Tudela	2015	9162	A	ABST	1965
	Ebro	Fustiñana, Navarra	Bajo Ebro	2006	9285	A	ABST	2006
			Arrubal-Agoncillo	¿	9120	A	ABST	1948
Mendavía				2006*	9121	A	ABST	1949
Arba de Biel	Erla, Zaragoza	Luna	2003	9187	A	ABST	1978	
JÚCAR	Ebrón	Castielfabib, Valencia	Castielfabib	2004*	8104	A	ABST	1989
	Turia	Manises, Valencia	Camp de Turia, II	¿?	8025	A	ABST	1912
	Lezuza	Lezuza, Albacete	Lezuza	2011	8137	A	ABST	1969
	Arquilla	Balazote, Albacete	Balazote	2011	8138	A	ABST	1969
	SEGURA	Derramador	Jacarilla, Valencia	Jacarilla-Bigastro	2006*	7070	A	ABST

(1) Año Inicio EDAR: (*) Dato recaudado a través del contacto con la entidad competente debido a su ausencia en una base de datos online; (?) Dato desconocido a pesar del contacto con la entidad competente. (2) Estado EA: (A) Alta o (B) Baja. (3) Posición EA: (AB) Aguas abajo, (AR) aguas arriba, (CT) con un tributario, (CXT) con dos o más tributarios –siendo X el número de tributarios–, y (ST) sin tributario.

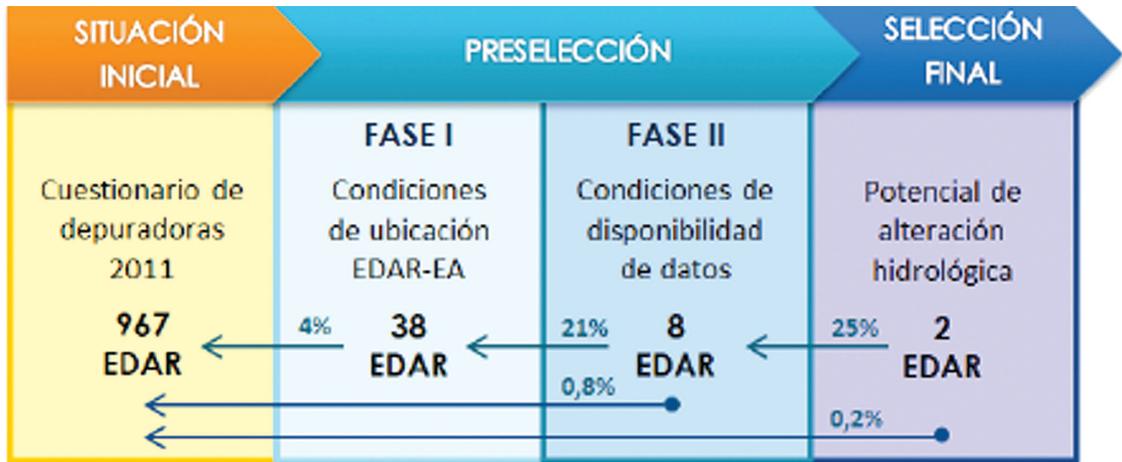


Figura 2. Resultados del proceso de selección de las EDAR para las Demarcaciones del Tajo, Ebro, Segura y Júcar.

Tabla 2. Datos de las EDAR y estaciones de aforo (EA) utilizadas. Para simplificar la representación en los años hidrológicos sólo se cita el de inicio.

CH	RÍO	EDAR	Año inicio EDAR	Hab-eq Volumen autorizado anual (hm^3)	Aportación anual rég. natural SIMPA (hm^3)	EA	Período pre-EDAR	Período post-EDAR
TAJO	Manzanares	Sur	1983	2.937.600 204,8	3148	A 3177	1965-1983	1984-2012
		Efecto conjunto de 12 EDARs	1981	10.756.593 630,6		B 3070	1984-2005	-
						3177	-	1984-2005
	Guadarrama	El Chaparral	1988	60.000 4,8	35	3100	1962-1988	1989-2002
	Arroyo Culebro (AC)	AC Cuenca Media-Alta	2007	2.577.870 110,4	1	6232	1979-2000	-
		AC Cuenca Baja	2008					
EBRO	Segre	Puigcerdá	1995	29.372 3,03	101,3	9021	1921-1995	1996-2006

El río Manzanares en la EDAR Sur comprende un tramo muy alterado por numerosas infraestructuras aguas arriba como embalses y depuradoras, construidas para servicio de la ciudad de Madrid. Inicialmente presentaba un ICAH 5 muy elevado, tanto individualmente (1,38) como acumulado (4,17) ya que existen otras 11 EDARs aguas arriba. Existen además 3 grandes embalses (Navacerrada, Santillana y El Pardo) que en su conjunto producen un ICAH 1 de 0,43. Además en el periodo de estudio, se ha producido en la cuenca un incremento de la superficie urbanizada de más del 21%. El estudio pre-post EDAR Sur con IAHRIS en la EA

Tabla 3. Resumen de resultados de los casos estudiados. (Para la EDAR Sur, sólo se presentan los resultados del estudio B).

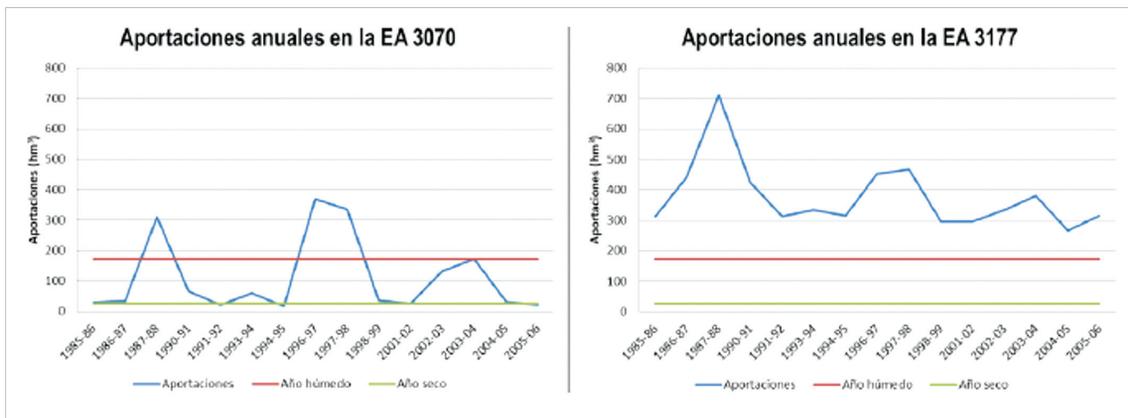
EDAR	ALTERACIÓN POTENCIAL	ALTERACIÓN REAL		
	Ratios anuales	Ratios estacionales	Ratios mensuales	Resultados IAHRIS
Sur (estudio B)	ICAH 1=0,43 ICAH 5=1,38 ICAH 5 acumulado= 4,17	Máximo= 0,75 en los veranos de años secos Otros valores > 0,40 en casi todas las estaciones de todos los tipos de año	Máximo= 0,91 en agosto de años secos Otros valores > 0,30 en casi todos los meses de todos los tipos de año Incremento de Aportaciones mensuales en año seco desde 904% (agosto) hasta 1936 % (diciembre)	Incremento de: aportaciones anuales de hasta un 1400% en años secos; aportaciones mensuales entre 500 y 2000%; Valor del Qs del 900% Reducción al 0,2% en la duración de las sequías Índice de estacionalidad de sequías =0 para todos los meses
El Chaparral	ICHA 1=0,08 ICAH 5=0,13	Máximo= 2,66 en los veranos de años secos Otros valores > 0,30 todo el año seco	Máximo= 19,47 en agosto de años secos Otros valores > 0,30 en todo el año seco excepto febrero.	Incremento de Aportaciones mensuales en año seco de 244% (agosto) hasta 1936 (diciembre) Alteración extrema en sequías Pérdida del carácter estacional (Q=0) Incremento del Qs en un 170%
Arroyo Culebro Cuenca baja	ICHA 1= 0,0 ICAH 5=63,1 ICAH 5 acumulado = 110,4	Máximo= 319,06 en primavera y verano de años secos Otros valores > 13 en años medios y >4,5 en años húmedos	Máximo= 602,3 en marzo de años secos Otros valores > 10 todos los meses del año medio y >4 en todo el año húmedo.	Alteración extrema en sequías Pérdida del carácter estacional (Q=0) en régimen natural durante 6 meses en años secos

3177 (estudio A) evidencia una alteración hidrológica extrema en todos los componentes del régimen de caudales como consecuencia de las perturbaciones mencionadas. Para intentar discriminar el efecto de las EDARs se realizó un nuevo análisis (estudio B, ver *Tabla 2*) para el período 1984/85- 2005/06 entre la EA 3070 y la EA 3177, ubicadas respectivamente aguas arriba y aguas abajo del núcleo de Madrid y del conjunto de EDAR existentes (La China, Viveros de la Villa, Butarque, Sur, Hoyo de Manzanares, Navarrosillo, Santillana, Las Rozas, Las Matas-Peñascales, Arroyo Culebro Cuenca Media Alta y Cuenca Baja y La Gavia). Para homologar los datos fue necesario corregir los caudales específicos de la EA 3070 según el valor medio de escorrentía de la intercuenca (escorrentía total anual (mm) para 1980/81-2005-06 del visor del MAPAMA). Los resultados evidencian (*Tabla 3*) una transformación radical del régimen hidrológico, en el que se incrementan las

Tabla 4. Aportaciones anuales por tipo de año para el período 1984-2006 correspondiente al estudio B en la EDAR SUR.

Tipo de año	APORTACIONES ANUALES (hm ³)		
	Régimen Pre EDAR	Régimen Post EDAR	Variación (%)
Húmedo	297,1	502,8	169,2
Medio	56,7	344,4	607,4
Seco	22,1	310,2	1404,0

aportaciones anuales en un 1400% en años secos (*Figura 3*), se incrementan las mensuales hasta en un 2000% y desaparecen las sequías por completo. Las curvas de caudales clasificados para ambos períodos evidencian drásticos cambios en la magnitud, frecuencia y variabilidad de los caudales medios circulantes (*Figura 4*). El índice de estacionalidad de las sequías toma un valor de 0 (alteración máxima) en todos los meses. En su conjunto las EDAR actúan como un trasvase inducido de aportaciones entre la cuenca del Lozoya (cuenca principal del abastecimiento a Madrid) y la del Manzanares (cuenca de vertido de efluentes).

**Figura 3.** Aportaciones anuales y umbrales para el año húmedo y seco obtenidos con IAHRIS para el período 1984-2006 correspondiente al estudio B en la EDAR SUR. Los resultados en la EA 3070 corresponden al régimen pre-EDAR y los de la EA 3177 al post-EDAR.

El río Guadarrama en la EDAR El Chaparral es un tramo caracterizado por encontrarse en un régimen casi natural, contando tan sólo con un pequeño embalse de escasa capacidad de afección (ICAH 1= 0,10). El ICAH 5 no supera el umbral de 0,3 pero presenta el valor más alto del resto de casos no seleccionados. En el análisis pre-post EDAR aparecen claramente alteraciones del régimen hidrológico vinculables a la puesta en marcha de la depuradora: incrementos considerables de las aportaciones en verano de hasta un 250% que alteran el carácter estacional natural al desaparecer los períodos de flujo cero.

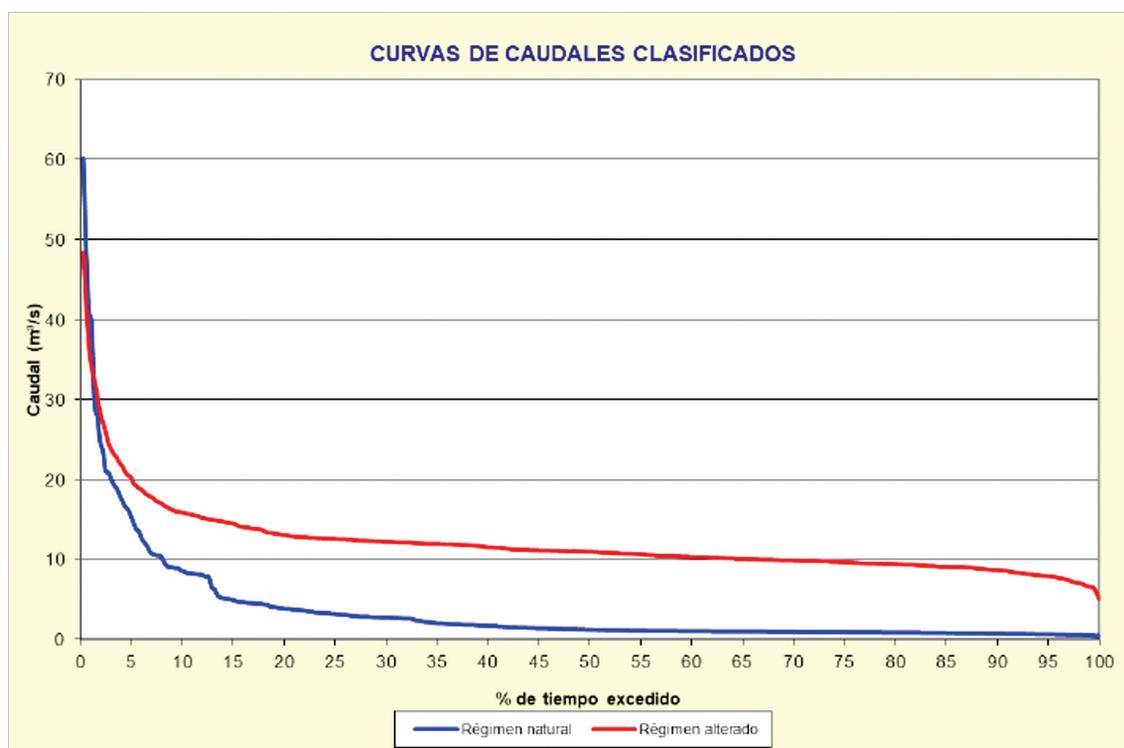


Figura 4. Curva de caudales clasificados para el período 1984-2006 correspondiente al estudio B en la EDAR SUR. En azul el régimen pre-EDAR (o natural) y en rojo el post-EDAR (o alterado).

El arroyo Culebro en la EDAR Arroyo Culebro Cuenca Baja presenta una cuenca muy urbanizada y con dos grandes depuradoras, presentando un elevado ICAH 5 de 110,4. Solo se dispone de registros de las aportaciones en régimen pre-EDAR, los cuales se modelizaron para calcular ratios estacionales y mensuales de alteración potencial. El resultado son valores extremadamente elevados, con ratios de hasta 602,3 en los años secos y con la pérdida del carácter estacional natural.

4. Conclusiones

El elevado número de EDARs existentes en nuestra red hidrográfica y su progresión creciente hacen necesaria una caracterización de la posible alteración hidrológica de sus vertidos en el cauce receptor. La metodología aquí presentada ofrece: unos indicadores de alteración potencial con alto valor discriminante y una caracterización de la alteración hidrológica mediante un conjunto de ratios y los resultados ofrecidos por el software IAHRIS. Como principales conclusiones obtenidas a partir de los casos de estudio pueden citarse las siguientes:

Respecto a la metodología presentada:

- El vertido de muchas de las EDAR a cauces no aforados impide la caracterización de la alteración hidrológica.

- La reciente creación de la mayoría de las EDAR, origina una reducida disponibilidad de datos de aforo asociados al periodo posterior a su puesta en funcionamiento.
- Como consecuencia de los dos aspectos citados anteriormente, junto con el descarte de aquellas EDARs con datos de aforo no representativos, de las 967 EDAR preseleccionadas (más de 10.000 hab-e), sólo 8 ellas tuvieron registros fiables en ambos periodos, y sólo 2 se catalogaron como con capacidad potencial de alteración.
- Se contrastó la eficacia del indicador ICAH5 como discriminante de alteraciones potenciales para valores mayores a 0,3.
- Se evidencia la alta eficacia de los ratios propuestos en este trabajo que al trabajar a escala mensual y estacional permiten discriminar alteraciones enmascaradas por el ICAH5.

Respecto a los casos de estudio:

- El caso del río Manzanares en la EDAR SUR y con el efecto acumulado de otras 11 EDAR aguas arriba denota alteraciones gravísimas en las aportaciones anuales y mensuales, con incrementos respecto al régimen pre-EDAR del 1400% y 2000% respectivamente. Los caudales mínimos anuales (Qs) se incrementan en un 900%. La curva de caudales clasificados muestra también una profunda distorsión entre ambos periodos lo que indica alteraciones gravísimas en magnitud y frecuencia de los caudales circulantes.
- Para el río Guadarrama en la EDAR del Chaparral los efectos se manifiestan más en los periodos secos con la pérdida del carácter estacional e incrementos del 170% en el Qs. En el caso del Arroyo Culebro la afección es potencialmente muy intensa con ICAHS y ratios muy elevados pero la falta de registros en el régimen post-EDAR no hizo posible el análisis con IAHRIS.

5. Bibliografía

- Cajigas Delgado, Á.; 2012. La evolución de la depuración de las aguas residuales urbanas en España. *Ingeniería civil*, 168: 9-20
- iAgua. 2017. Disponible en <https://www.iagua.es/noticias/espana/dbk/16/05/18/negocio-depuracion-aguas-alcanza-1230-millones-2015>
- Martínez, C.; Fernández, J.A.; 2010. *IAHRIS 2.2 Índices de Alteración Hidrológica en Ríos. Versión 2.2. 2010*. Disponible en <http://www.ecogesfor.org>
- MAPAMA. 2017. *Protocolo de Caracterización Hidromorfológica de masas de agua de la categoría Ríos* (Código M-R-HMF-2015 versión 2, actualizado a 17 mayo 2017).

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid. Disponible en https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/protocolo_hmf_v2_2017-05-17_tcm30-175291.pdf

