Contaminantes emergentes en aguas residuales urbanas y efluentes hospitalarios

Caracterización, rendimientos de eliminación en EDAR y estimación de la incidencia del vertido hospitalario en la EDAR de Galindo

Los análisis llevados a cabo en una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) urbana con tratamiento convencional, sobre más de 100 contaminantes emergentes (fármacos, hormonas, desinfectantes, pesticidas, estimulantes y drogas), demuestran que, si bien, una gran parte se eliminan en el tratamiento, otros permanecen en el efluente final, acabando en el medio ambiente. La aplicación de un tratamiento terciario de: coagulación-floculación, decantación, filtración en arena y desinfección consigue eliminar una gran parte de los compuestos detectados. El estudio realizado en el efluente de un vertido hospitalario demuestra que este es un foco importante de aporte de fármacos a la red de saneamiento. Por tanto, unos tratamientos adecuados de depuración en origen, junto con el uso responsable de los medicamentos por parte de la población, mitigarían su llegada a las EDAR, reduciendo su vertido al medio y evitando o reduciendo tratamientos finales, más costosos y ambientalmente menos sostenibles, que pueden terminar siendo necesarios ante futuras regulaciones legales.

Palabras clave
Contaminantes emergentes, aguas residuales, EDAR, vertidos hospitalarios, reducción en origen, legislación.

EMERGING CONTAMINANTS IN URBAN WASTEWATER AND HOSPITAL EFFLUENTS: CHARACTERIZATION, ELIMINATION YIELDS IN WWTP AND ESTIMATION OF THE INCIDENCE OF THE HOSPITAL WASTEWATER IN THE GALINDO WWTP

The analyzes carried out in an urban wastewater treatment plant (WWTP) with conventional treatment, on more than 100 emerging pollutants: pharmaceutical products, hormones, disinfectants, pesticides, stimulants and drugs, show that, although a great part are eliminated in the treatment, others remain in the final effluent, ending up in the environment. The application of a tertiary treatment: coagulation-flocculation, decantation, sand filtration and disinfection manages to eliminate a large part of the detected compounds. The study conducted in the effluent of a hospital discharge shows that this is an important source of drugs supply to the sanitation network. Therefore, proper purification treatments at source, together with the responsible use of medicines by the population, would mitigate their arrival at WWTPs, reducing their discharge to the environment and avoiding or reducing final, more expensive and environmentally less sustainable treatments, which may end up being necessary in the face of future legal regulations.

Keywords
Emerging pollutants, wastewater, WWTP, hospital discharge, reduction in origin, legislation.

Iñigo González Canal
responsable del Área de Control de Vertidos del Consorcio de Aguas de Bilbao Bizkaia

Iñaki Muga Relloso
técnico del Área de Control de Vertidos del Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia

José Rodríguez Medina
gestor de Transferencia Tecnológica de IK4 Tekniker

Miren Blanco Miguel
investigadora de la Unidad de Química de Superficies y Nanotecnologías de IK4 Tekniker

1. INTRODUCCIÓN

Los contaminantes emergentes son aquellos contaminantes desconocidos o no reconocidos actualmente como tales debido a que su detección es relativamente reciente. En la mayoría de los casos corresponden a contaminantes no regulados de los que a día de hoy se desconocen sus efectos potenciales, por lo que es difícil predecir qué efectos pueden provocar en la salud de los seres humanos y los organismos acuáticos (Petrovic, M. *et al.*, 2004; Snyder, S.A. *et al.*, 2003; Kuehn, B.M., 2008). Su reciente detección o frecuencia creciente de aparición se debe, en gran parte, al desarrollo de nuevos y más sensibles métodos de análisis, que permiten llegar a límites de detección de concentraciones traza (µg/L o ng/L), más que a nuevas fuentes de contaminación o vertidos en el medio. Por citar un ejemplo, la cafeína y la nicotina tienen presencia en las masas de agua desde hace más de un siglo, pero no es hasta estos últimos años cuando se han empezado a detectar sistemáticamente en las aguas.

Estudios desarrollados en todo el mundo han demostrado la presencia de microcontaminantes, principalmente de naturaleza orgánica, en aguas superficiales, aguas residuales e incluso aguas depuradas (Barceló, D., 2003; Kolpin, D.W. *et al.*, 2002; Daughton, C.G., 2004; Petrovic, M. *et al.*, 2003; Ternes, T.A., 1998). Así, se han detectado fármacos y productos de higiene personal, pesticidas, surfactantes, fenoles, retardantes de llama, estimulantes y drogas de abuso -entre otros- que son englobados en la categoría de compuestos con propiedades disruptoras endocrinas.

La gran preocupación generada por este tipo de sustancias se debe al efecto negativo que pueden causar en el medio ambiente por su continua incorporación (Barceló, D., 2004), pese a que los niveles detectados son relativamente bajos y muchos de ellos se degradan o transforman con cierta facilidad.

La principal fuente de entrada en el medio ambiente es a través de aguas residuales no tratadas (Benotti, M.J. *et al.*, 2009) y los efluentes de las EDAR (Postigo, C. *et al.*, 2008). Las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales no se han diseñado para la eliminación de este tipo de microcontaminantes, por lo que su eliminación en algunos casos no es completa. Por ello, se están desarrollando y estudiando procesos complementarios de depuración basados, por ejemplo, en procesos de nanofiltración (Bolong, N. *et al.*, 2009), procesos de oxidación avanzada (PAO) (Klamerth, N. *et al.*, 2010; Muthuvel, I. *et al.*, 2008) y procesos de electrocoagulación (Holt, P.K. *et al.*, 2005). De hecho, la aparición de trazas de contaminantes orgánicos en aguas residuales, su comportamiento durante el tratamiento y la producción de agua potable, son los temas claves que requieren más estudio a día de hoy.

2. DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE CONTAMINANTES EMERGENTES EN AGUAS RESIDUALES URBANAS

El trabajo de investigación fue llevado a cabo por IK4 Tekniker en la EDAR de Galindo (Sestao) del Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia. Dicha EDAR (1,5 millones de habitantes equivalentes) consta de los siguientes tratamientos y características:

- Línea de tratamiento: desbaste grueso, bombeo, tamizado, desarenado-desengrase, decantación primaria, tratamiento biológico con nitrificación-desnitrificación y decantación secundaria.
- Línea de fangos: espesamiento de fangos primarios, flotación de fangos biológicos, deshidratación en filtros-prensa e incineración.
- Línea de aire para tratamiento de olores.
- Caudal tratado en 2011: 106.055.151 m^3/año.
- Caudal diario en 2011: 290.562 m^3/día.
- Tratamiento terciario de 100 L/s para reutilización en planta: coagulación-floculación, decantación, filtración en arena y desinfección con UV e hipoclorito sódico.

El estudio de las sustancias en el agua de la EDAR se llevó a cabo en dos fases:

- Primera fase. Se llevó a cabo en el segundo semestre del año 2010. Consistió en una intensa campaña de muestreo, donde se recogieron 31 muestras compuestas del influente y 33 del efluente de la EDAR. Se realizó un estudio de análisis de 114 compuestos correspondientes a diferentes familias de contaminantes emergentes en el influente de la EDAR, su grado de eliminación en un sistema de depuración convencional (aguas de salida EDAR) y tratamientos factibles para su eliminación. La selección de los contaminantes a analizar en las muestras tomadas se basó en datos bibliográficos estudiados, en la capacidad de caracterización de los diferentes compuestos y en estudios internos realizados en diferentes EDAR en España. Los compuestos analizados se agruparon por familias de contaminantes, en función de la tipología y usos de los mismos. Las familias analizadas fueron las siguientes:

- Fármacos (analgésicos, ansiolíticos, antibióticos, anticoagulantes, antidepresivos, antiinflamatorios, antilipídicos, beta-bloqueantes, corticoides y hormonas).
- Desinfectantes de uso industrial.
- Disruptores endocrinos (bisfenol-A).
- Estimulantes, psicofármacos y drogas de abuso.
- Herbicidas.

Cabe destacar que los fármacos y drogas de abuso pueden llegar al agua residual en su forma original y en su forma metabolizada.

- Segunda fase. Se realizó en el segundo semestre del 2011, y consistió en analizar de nuevo el influente (10 muestras) y el efluente (18 muestras) de la misma EDAR. El muestreo se amplió al estudio de análisis del efluente del tratamiento terciario (9 muestras) que dispone la EDAR y al análisis del vertido de un centro hospitalario conectado a la EDAR (21 muestras). En esta campaña se analizaron 79 compuestos correspondientes a los 43 detectados durante la primera fase. También fueron detectados compuestos nuevos, típicos de vertidos hospitalarios, como agentes de contraste de rayos X, antineoplásicos y anestésicos. Como resultado de este segundo estudio, se confirmaron los rendimientos de eliminación en el tratamiento biológico de la EDAR y se constató que el tratamiento terciario permitía la eliminación de algunos compuestos recalcitrantes, destacando el diclofenaco.

TABLA 1

MUESTREOS REALIZADOS EN LA EDAR DE GALINDO.

Año	Nº compuestos analizados	Nº compuestos detectados		
		Influente EDAR	Efluente EDAR	Efluente terciario
2010	114	43	37	No analizado
2011	79	29	27	20

El método de caracterización se basó en cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (XLC/MS/MS). Se diseñó un método robusto que permitió el análisis de los compuestos seleccionados de forma simultánea en la primera fase e incluyó nuevos contaminantes durante la segunda.

Los resultados obtenidos en las dos fases de estudio (**Tabla 1**), indicaron:

- Presencia de un importante número de contaminantes emergentes en las aguas del influente y del efluente biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales.

FIGURA 1. Frecuencia de detección de contaminantes emergentes en la entrada de la EDAR.

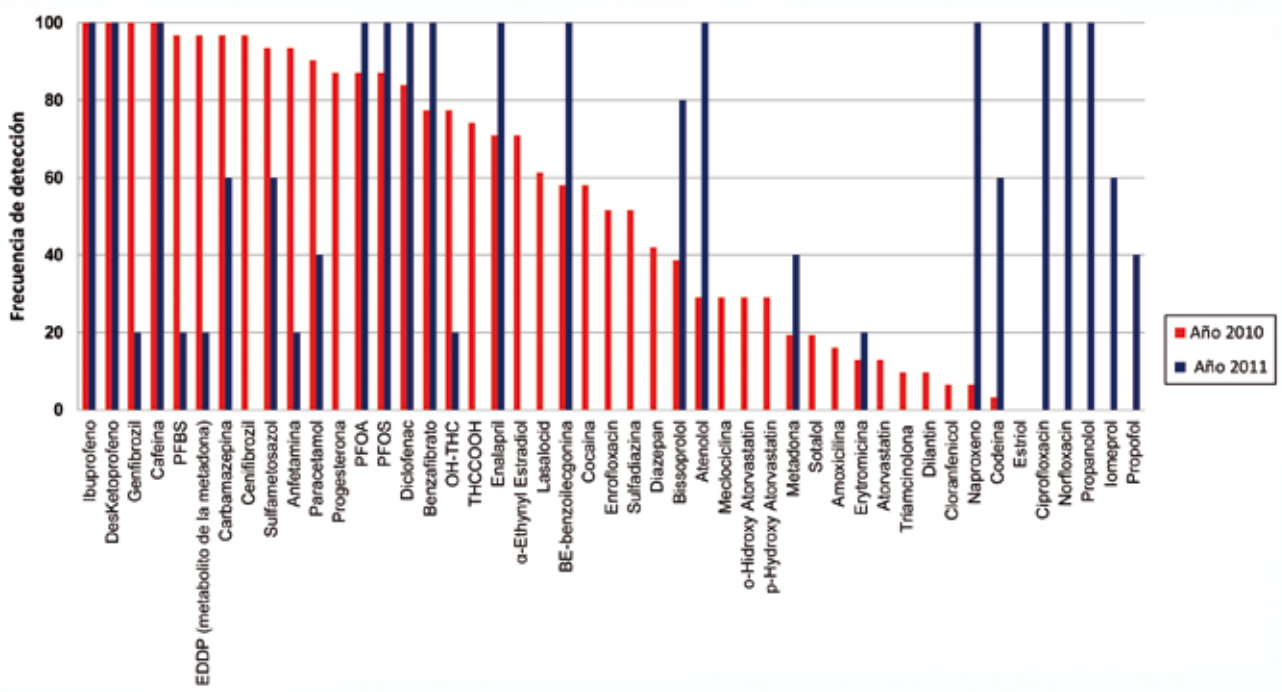
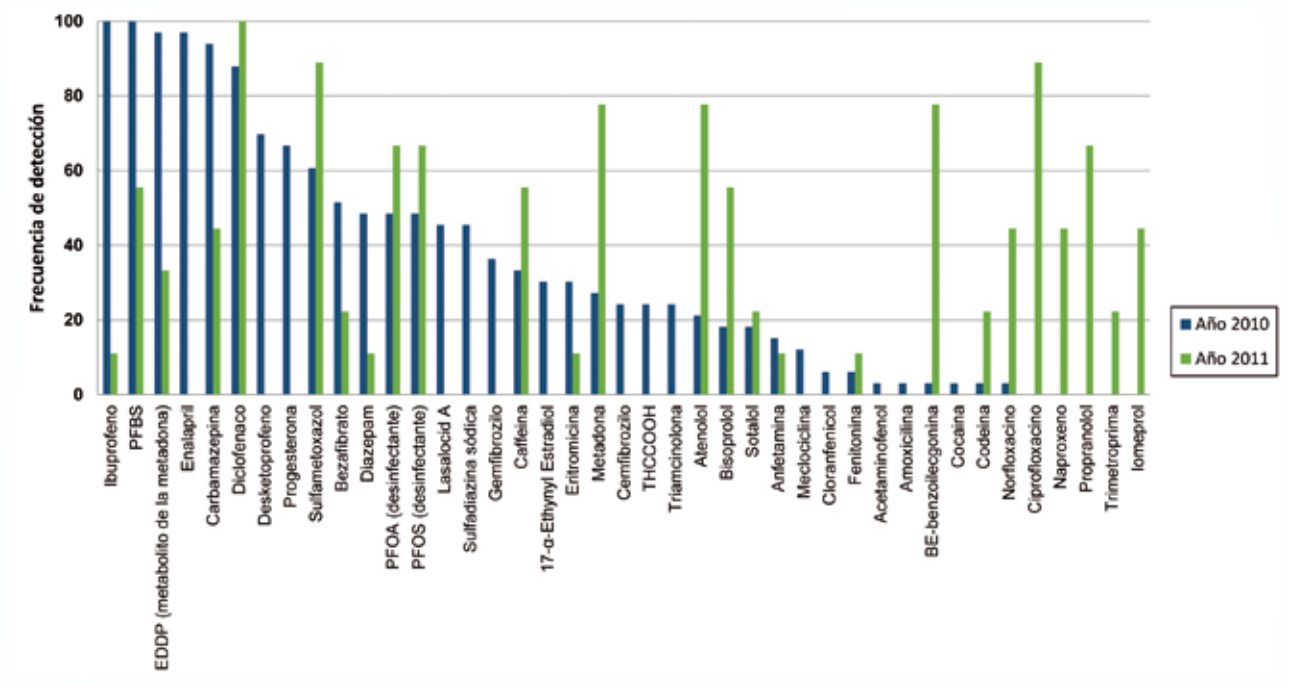


FIGURA 2. Frecuencia de detección de contaminantes emergentes en la salida de la EDAR.



- Disminución muy significativa en el número de detecciones tras el tratamiento terciario.

En la **Figura 1** y en la **Figura 2** se muestran los compuestos y su frecuencia de detección en las aguas de entrada y salida. Se observa claramente que existen diferencias significativas en las dos campañas, en parte porque existen compuestos que solo se analizaron en una de ellas y en parte porque el número de muestras analizado en la segunda campaña fue inferior.

Se aprecian, en general, los mismos compuestos a la entrada que a la salida. Sin embargo, la frecuencia de detección decrece muy significativamente tras el tratamiento realizado en la EDAR.

Algunos compuestos se detectan siempre o casi siempre (diclofenaco, sulfametoxazol, iomeprol, ciprofloxacino, carbamazepina, PFBS, etc.) mientras que otros, el ibuprofeno, el desketoprofeno o el gemfibrozilo, se mineralizan o absorben sobre el fan-

TABLA 2

CONCENTRACIONES MEDIAS DE LOS PRINCIPALES COMPUESTOS DETECTADOS EN LA EDAR AÑO 2010 (LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN 0,1 µG/L)

Entrada	µg/L	Salida	µg/L
Cafeína	131,7	PFBS	35,7
PFBS	77,9	Ibuprofeno	29,5
Ibuprofeno	41,0	EDDP	8,1
Progesterona	15,2	Carbamazepina	5,3
Anfetamina	12,5	Diazepan	4,4
α-Etynyl Estradiol	10,4	Diclofenaco	3,7
Sulfametosazol	9,0	Enalapril	3,6
Desketoprofeno	6,6	Sulfametosazol	3,5
PFOS	6,5	Ketoprofeno	3,0
EDDP	6,3	Cafeína	2,1
Acetaminofeno	6,1	PFOS	1,8
Carbamazepina	5,9	Sotalol	1,8
OH-THC	4,7	Enrofloxacin	1,6
THCCOOH	4,3	Progesterona	1,5
Diazepan	3,6	THCCOOH	1,5
Cocaína	3,6	Sulfadiazina	0,9

go activado (muestreo 2011). La diferencia tan significativa encontrada para el ibuprofeno puede explicarse por la cantidad promedio detectada (muy superior en 2010) que concuerda con los datos de consumo de Ibuprofeno suministrados (Hospital de Galdakao, fuente interna).

En la **Tabla 2** se muestran, de mayor a menor concentración promedio, los principales principios activos detectados en el influente y efluente en el año 2010, y en la **Tabla 3**, los del año 2011.

En general se aprecia que existe cierta coherencia con los principios activos detectados en ambas campañas, si bien existe una disminución significativa para los desinfectantes tipo ácido perfluorosulfónicos y el ibuprofeno. También es de resaltar que la concentración detectada en los compuestos, en general, es inferior en el año 2011 cuando el número de muestras analizado fue inferior al del 2010.

A la entrada de la EDAR se detectan, a niveles de partes por millón:

- Fármacos más habituales: antiinflamatorios (ibuprofeno y ketoprofeno), analgésico (paracetamol), reductores del colesterol (gemfibrozil y cenfibrozil), antiepilépticos (carbamazepina) y antibióticos (sulfametoxazol, ciprofloxacino, norfloxacino).
- Desinfectantes.
- Agentes de contraste de rayos X (iomeprol).
- Cafeína.
- Una gran variedad de drogas de abuso: anfetamina, EDDP (metabolito de la metadona), cannabis y sus metabolitos, y en menor medida cocaína y su metabolito.

A la salida de la EDAR, los principales compuestos se repiten. Sin embargo, la mayor parte disminuye o desaparece.

Los fármacos encontrados en el influente y efluente están en consonancia con los encontrados en la bibliografía para otras EDAR (Postigo, C. *et al.*, 2008a).

En la **Tabla 4** se presentan los rendimientos de eliminación de varios compuestos detectados en la EDAR. Se observa que para ciertos compuestos la eliminación es total, mientras que para otros la eliminación resulta ser muy baja.

Estos valores dan una idea de qué compuestos pueden ser claramente no biodegradables y persistentes a los tratamientos biológicos de depuración. Relacionando los resultados de ambos años se observan datos comparables para la mayor parte de principios activos analizados, salvo para el caso de varios antiinflamatorios (ibuprofeno y desketofropeno), el sulfametoxazol, la codeína o la anfetamina (**Tabla 5**).

Si se agrupan los compuestos por familias, puede concluirse que el rendimiento de eliminación es:

- Muy bajo (0-20 %): ansiolíticos, fármacos de uso psiquiátrico, un único compuesto analizado para la hipertensión.
- Bajo (20-50%): desinfectantes de uso industrial, antibióticos.
- Medio (50-70%): drogas de abuso (incluye drogas y sus metabolitos).

TABLA 3

CONCENTRACIONES MEDIAS DE LOS PRINCIPALES COMPUESTOS DETECTADOS EN LA EDAR AÑO 2011 (LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN 0,10 µG/L).

Entrada	µg/L	Salida	µg/L
Cafeína	39,44	Iomeprol	7,40
Iomeprol	27,32	PFBS	4,64
Ibuprofeno	13,51	AM	1,01
BE	3,04	Diclofenaco	0,73
Propanolol	2,68	Ciprofloxacin	0,72
Ciprofloxacin	2,51	BE	0,56
Gemfibrozil	2,36	Norfloxacin	0,48
Naproxeno	2,00	PFOA	0,35
AM	1,88	Sulfametoxazol	0,25
Norfloxacin	1,76	Metadona	0,25
Desketoprofeno	0,91	Sotalol	0,23
Atenolol	0,82	Propanolol	0,17
Diclofenaco	0,74	PFOS	0,15
PFOA	0,73	Trimetropin	0,13
Bezafibrato	0,52	Naproxeno	0,12
OH-THC	0,43	EDDP	0,11

TABLA 4

RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN EN TRATAMIENTO CONVENCIONAL Y TRATAMIENTO TERCIARIO DE LA DEPURADORA DE GALINDO (N.A. = NO ANALIZADO; * = DATOS ANORMALES; T.TERCIARIO = TRATAMIENTO TERCIARIO QUE INCLUYE LA SUMA DEL TRATAMIENTO SECUNDARIO MÁS EL TERCIARIO).

Principio activo	2010	2011	
	Efluente biológico Reducción%	Efluente biológico Reducción %	Efluente t.terciario Reducción %
Acetominophen	100	100	100
Anfetamina	96	46	16
Atenolol	55	87	100
BE-benzoilecgonina	100	82	92
Bezafibrato	81	100	100
Bissoprolol	63	100	100
Cafeína	98	100	100
Carbamazepina	10	n.a.	n.a.
Cirpofloxacin	n.a.	71	100
Codeína	44	100	100
Desketoprofeno	55	100	100
Diclofenaco	0	1	100
EDDP (metabolito de la metadona)	0	n.a.	n.a.
Enalapril	0	100	100
Eritromicin	0	n.a.	n.a.
Gemfibrozil	92	100	100
Ibuprofeno	28	100	100
Iomeprol	n.a.	73	74
Metadona	0	14	62
Naproxeno	n.a.	94	100
Norfloxacin	n.a.	73	100
OH-THC	100	100	100
PFBS	54	*	100
PFOA	*	52	64
PFOS	72	55	68
Propanolol	n.a.	94	100
Propofol	n.a.	100	100
Sotalol	0	12	100
Sulfametizol	18	n.a.	n.a.
Sulfametoxazol	61	24	100

- Alto (70-85%): agentes de contraste de rayos X.
- Muy alto (80-100%): analgésicos, cafeína, antilipídicos, anestésicos.

Los datos no son concluyentes:

- Hormonas: solo se detectan en el estudio de 2010, aunque en este estudio su reducción supera el 90%.
- Beta-bloqueantes: los valores detectados tanto en el influente como en el efluente se encuentran muy próximos al límite de cuantificación.
- Antiinflamatorios: los resultados son variables, si bien se encuentran en valores reportados en la bibliografía.

3. DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE CONTAMINANTES EMERGENTES EN VERTIDOS HOSPITALARIOS

En la **Figura 3** se muestran aquellos compuestos detectados al menos una vez, durante el desarrollo de la campaña de muestreo. Dicho muestreo se realizó en el segundo semestre de 2011 y consistió en 21 tomas de muestras compuestas en el vertido (103.445 m^3/año) del Hospital de Galdakao (Bizkaia). Este vertido supone un 17,4% del vertido total de 9 centros hospitalarios (593.367 m^3/año) a la EDAR de Galindo, en donde dichos vertidos representan un 0,56% del caudal tratado por la planta depuradora.

Se aprecia la detección de fármacos y compuestos de uso más habituales en hospitales:

- Antiinflamatorios: ibuprofeno, desketoprofeno, naproxeno, diclofenaco.
- Agente de contraste de rayos X: iomeprol.
- Antilipídicos o reductores de colesterol: gemfibrozilo.

TABLA 5

REDUCCIÓN EN FAMILIAS DE CONTAMINANTES EMERGENTES TRAS EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO REALIZADO EN LA EDAR (N.A. = NO ANALIZADO; N.D. = NO DETECTADO).

Familia	Reducción %	
	2010	2011
Analgésico	100	100
Excitante	98	100
Antilipídico	92	100
Hormonas	92	n.d.
Droga lícita	69	67
Antibiótico	32	66
Antiinflamatorio	27	95
Antiepiléptico	10	n.d.
ECA	0	n.d.
β-bloqueante	0	87
Ansiolítico	0	n.d.
Anestésico	n.a.	100
ICM	n.a.	73

- Antiepilépticos: carbamazepina.
- Antibióticos: ciprofloxacino, trimetropina, sulfametoxazol.
- Desinfectantes: PFBS, PFOA, PFOS.
- Anestésico: propofol.
- Beta bloqueantes: propanolol, atenolol, bisoprolol.
- Estimulantes: cafeína.
- Drogas de abuso de uso terapéutico: anfetamina, codeína, metadona, EDDP, opiáceos, cocaína y su metabolito.

Los principios activos detectados están totalmente relacionados con lo esperado según los datos aportados por el citado hospital (**Tabla 6**) en referencia al consumo realizado en 2011 con respecto a los compuestos analizados. En la **Tabla 7** se presentan los datos analíticos obtenidos, promedio, máximo y mínimo por compuesto analizado detectado en las aguas residuales hospitalarias. Comparando estos resultados con los que se encuentran en la bibliografía (Verlicchi, P. *et al*., 2010), los valores encontrados para el iomeprol, a pesar de ser muy elevados, no difieren de lo esperado (habitualmente se encuentran otros compuestos iodados más habituales como el iopamidol). En este caso, Osakidetza (Servicio Vasco de Salud) utilizó el iomeprol y el iodixanol específicamente durante los años 2011 y 2012. El resto se encuentran dentro de los límites de valores encontrados ya documentados, a pesar de presentar valores bastante elevados, como es el caso de los antibióticos detectados.

4. IDENTIFICACIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES PROCEDENTES DEL VERTIDO HOSPITALARIO Y EXTRAHOSPITALARIO EN LA EDAR DE GALINDO

Para identificar qué contaminantes emergentes detectados tienen su origen en el vertido hospitalario y cuáles son de uso externo a los hos-

FIGURA 3. Frecuencia de detección de contaminantes emergentes en vertido hospitalario.

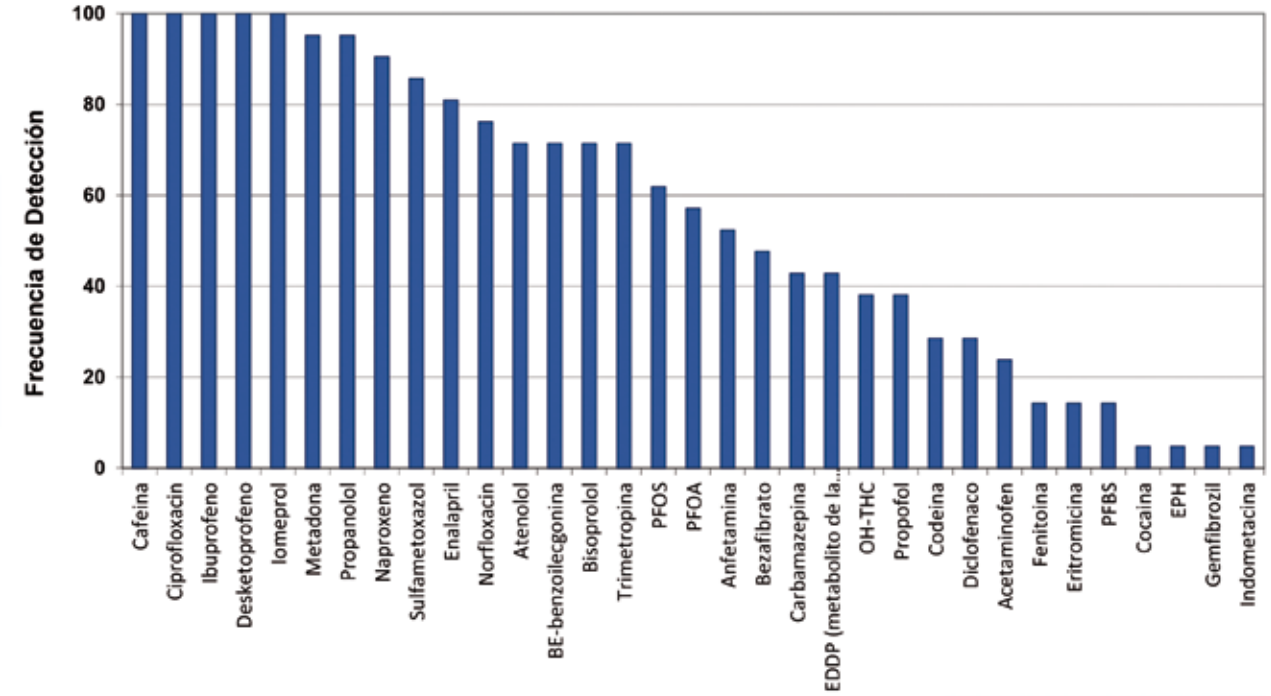


TABLA 6

CANTIDAD EN PESO ANUAL SUMINISTRADA POR PRINCIPIO ACTIVO EN EL HOSPITAL DE GALDAKAO.

Cantidad kg/año	Principio activo	Familia	Cantidad kg/año	Principio activo	Familia
883,72	Iomeprol	ICM	6,90	Propofol	Anestésico
162,05	Povidona iodada	Desinfectante, antiséptico	6,51	Raltegravir	Antiretroviral/SIDA
143,56	Acetaminofen	Analgésico	6,04	Levofloxacino	Antibiótico
138,02	Metamizol magnésico	Analgésico	5,85	Tazobactam	Antibiótico
84,73	Lidocaína, HCL	Antiséptico	5,80	Ritonavir	Antiretroviral/SIDA
61,74	Iodixanol	ICM	5,69	Ciprofloxacina	Antibiótico
55,28	Amoxicilina	Antibiótico	5,09	Acetilsalicilico	Analgésico
44,48	Piperacilina	Antibiótico	4,72	Ritonavir	Antiretroviral/SIDA
34,05	Ibuprofeno	Antiinflamatorio	4,41	Colestiramina	Antilipídicos
23,18	Lopinavir	Antiretroviral/SIDA	3,89	Cefotaxima	Antibiótico
19,22	Lactitol	Laxante	3,68	Enoxaparina sódica	Anticoagulante
18,43	Emtrocitabina	Antiretroviral/SIDA	3,48	Mepivacaína, CLH	Anestésico
17,00	Abacavir	Antiretroviral/SIDA	3,42	Metronidazol	Antibiótico
15,57	Ribavirina	Antiviral	3,29	Omeprazol	Protector estomacal
14,18	Nevirapina	Antiretroviral/SIDA	3,06	Ranitidina	Antihistamínico
13,92	Tenofovir	Antiretroviral/SIDA	2,81	Micofenolato mofetilo	Agente inmunosopresor
13,32	Acetilcisteína	Mucolítico	2,71	Ceftazidima	Antibiótico
12,35	Fosamprenavir	Antiretroviral/SIDA	2,65	Cloxacilina	Antibiótico
11,53	Cefazolina	Antibiótico	2,62	Vancomicina, HCL	Antibactericida
10,19	Metformina	Antidiabético	2,62	Imipenem-Cilastatin	Antibiótico
9,94	Meropenem	Antibiótico	2,45	Clindamicina	Antibiótico
9,18	Glucosaminagluconato	Antitrombótico	2,39	Costrimoxazol	Antibiótico
7,74	Ceftriaxona	Antibiótico	2,33	Valproato	Anticonvulsivo
7,70	Lamivudina	Antiviral	2,29	Lamivudina (3TC)	Antiretroviral/SIDA
6,93	Efavirenz	Antiretroviral/SIDA	2,03	Amikacina	Antibiótico

» Este estudio permite confirmar la presencia de contaminantes emergentes, su grado de eliminación en el tratamiento biológico convencional de una EDAR urbana y también que los tratamientos terciarios convencionales son efectivos para la eliminación de una gran parte de los compuestos detectados

TABLA 7

VALORES PROMEDIO ENCONTRADOS EN EL VERTIDO HOSPITALARIO.

Principio activo	Valor (µg/L)		
	Máximo	Mínimo	Promedio
Acetaminofen	65,57	< 0,10	4,36
Anfetamina	24,60	< 0,10	6,12
Atenolol	7,23	< 0,10	0,88
BE-benzoilecgonina	1,73	< 0,10	0,37
Bezafibrato	26,50	< 0,10	2,33
Bisoprolol	1,16	< 0,01	0,17
Cafeína	133,11	12,50	68,05
Carbamazepina	0,71	< 0,10	0,11
Cirpofloxacin	74,10	0,81	18,63
Cocaína	0,04	< 0,01	< 0,01
Codeína	0,46	< 0,01	0,12
Diclofenaco	6,08	< 0,10	0,35
Fenitoina	0,46	< 0,10	< 0,10
EDDP (metabolito de la metadona)	3,83	< 0,10	0,36
Enalapril	3,52	< 0,10	0,61
EPH	0,76	< 0,10	< 0,10
Eritromicina	37,31	< 0,10	1,87
Gemfibrozil	33,10	< 0,10	1,58
Ibuprofeno	17,10	< 0,10	6,69
Indometacina	0,23	< 0,10	< 0,10
Iomeprol	3.150,00	42,43	817,35
Desketoprofeno	16,42	1,30	7,43
Metadona	3,07	< 0,08	0,82
Naproxeno	4,60	< 0,10	0,73
Norfloxacina	9,22	< 0,10	1,64
OH-THC	4,00	< 0,10	1,49
PFBS	22,32	< 0,10	1,13
PFOA	268,12	< 0,10	21,26
PFOS	132,04	< 0,10	6,73
Propofol	0,48	< 0,10	0,13
Propanolol	16,70	< 0,10	4,68
Sulfametoxazol	11,30	< 0,10	2,56
Trimetropina	8,71	< 0,10	1,37

pitales, se considera el vertido de los 9 centros hospitalarios que en 2011 estaban conectados a la EDAR de Galindo, y se realiza una estimación teórica con las siguientes consideraciones:

- Los volúmenes vertidos por los hospitales se obtienen de los datos de agua de suministro, considerando que el volumen vertido es igual al volumen suministrado.
- Las concentraciones de contaminantes emergentes detectadas en los análisis efectuados en el Hospital de Galdakao se aplican al volumen total del vertido hospitalario.
- Se seleccionan aquellos contaminantes que se detectaron en mayores concentraciones en el vertido del Hospital de Galdakao o en la EDAR de Galindo.

Con estas premisas se elabora la **Tabla 8**, en la que se han destacado aquellos contaminantes que, según el cálculo teórico realizado, suponen porcentajes mayores del 4% de la concentración media en el influente de la EDAR, lo que indica que el vertido hospitalario tiene un peso específico muy importante. De su análisis se extraen las siguientes conclusiones:

- Los emergentes que supondrían una concentración media superior al 9% en el influente de la EDAR son: paracetamol (analgésico), eritromicina (antibiótico), perfluoroalquilos PFBS, PFOA y PFOS (desinfectantes), iomeprol (agente de contraste de rayos X).
- En un segundo orden de magnitud estarían otros contaminantes emergentes, que supondrían concentraciones, respecto a la media, del orden de 4%, como es el caso de: ciprofloxacino (antibiótico), sul-

» En la EDAR de Galindo, pese a que el vertido hospitalario solo representa el 0,56% del caudal tratado, en algunos contaminantes alcanza entre el 4 y el 20% de la concentración media detectada en el influente. Por este motivo, no parece lógico implementar un tratamiento de eliminación de ciertos contaminantes emergentes en esta depuradora, que trata 106 millones de m^3 al año, sin previamente realizar la eliminación en origen

fametoxazol (antibiótico), desketoprofeno (antiinflamatorio).

- Otros contaminantes emergentes tienen su origen en el uso general de la población fuera de los centros hospitalarios. Esto ocurre principalmente con los siguientes compuestos: antiinflamatorios como el diclofenaco, el ibuprofeno, el naproxeno, etc., drogas (anfetamina, cocaína, codeína, metadona), antibióticos (norfloxacina, trimetropina), antiepilépticos (carbamezapina, fenitoina) y estimulantes como la cafeína.

Como se muestra en la **Tabla 4**, los rendimientos de eliminación en la EDAR de algunos contaminantes emergentes de origen hospitalario, tales como los antibióticos y los desinfectantes de perfluoroalquilos (PFBS, PFOA y PFOS), son del 20 al 50%. En el caso del agente de contraste de rayos X iomeprol, aunque el rendimiento de eliminación es del orden del 75%, el efluente de la EDAR presenta las concentraciones más elevadas de todos los contaminantes analizados, con valores medios de 7,4 µg/L y un máximo de 21,9 µg/L.

En el caso de la EDAR de Galindo, pese a que el vertido hospitalario solo representa el 0,56% del caudal tratado en la depuradora, en algunos contaminantes representa entre el 4 y el 20% de la concentración media detectada en el influente, alcanzando hasta el 63% en el caso del compuesto PFBS. Por este motivo, no parece lógico implementar un tratamiento de eliminación de ciertos contaminantes emergentes en el efluente de una EDAR como la de Galindo, que trata 106 millones de m^3 al año, sin previamente realizar la eliminación en origen.

Así lo han entendido en Dinamarca, donde el Hospital Herlev [12] ha implantado un tratamiento de sus aguas residuales consistente en:

- Tratamiento biológico avanzado MBR (reactor biológico con membranas de ultrafiltración)
- Postratamiento de oxidación con dos líneas: línea 1 de carbón activado seguido de oxidación química por ozono y/o agua oxigenada; y línea 2 de oxidación por ozono, seguida por carbón activado.

Este tratamiento obtiene rendimientos de eliminación del 99%.

5. NORMAS DE CALIDAD AMBIENTAL

La Directiva 2013/39/UE y el Real Decreto 817/2015 establecen Normas de Calidad Ambiental (NCA) en el medio receptor para 45 sustancias definidas como prioritarias. En esta directiva se definen los estándares de calidad ambiental (EQSs) en forma de media anual y, para algunas sustancias, concentraciones máximas admisibles. Entre estas está el ácido perfluoro-octanosulfónico y sus derivados (PFOS)

La Comisión Europea está estudiando los riesgos medioambientales de los medicamentos y desarrollará un enfoque estratégico para la contaminación del agua por sustancias farmacéuticas. Este enfoque incluirá:

- Propuestas para que se consideren los impactos medioambientales de los medicamentos en su comercialización.
- Medidas a escala de la UE para reducir descargas, emisiones y pérdidas en el medio acuático, teniendo en cuenta necesidades de salud pública y la relación coste/eficacia.

Cada 4 años se debe proceder a la revisión de la lista de sustancias prioritarias, de tal forma que, -tras un trabajo de revisión- hay 10 nuevas sustancias candidatas a entrar en esta clasificación, que se recogen en la Decisión de Ejecución (UE) 2015/495 de la Comisión, de 20 de marzo de 2015. Algunas de ellas son: el diclofenaco (antiinflamatorio), antibióticos macrólidos (eritromicina, claritromicina, azitromicina) y las hormonas: 17-beta-Estradiol (E2) y 17-alfa-Etinilestradiol (EE2).

La aparición de este tipo de sustancias en el efluente de la EDAR podría hacer necesario un tratamiento adicional para garantizar el cumplimiento de las NCA en el

TABLA 8

RESULTADOS ANALÍTICOS DE CONTAMINANTES EMERGENTES EN EL VERTIDO HOSPITALARIO DE GALDAKAO, EN EL INFLUENTE Y EFLUENTE DE VERDE, CONTAMINANTES CON INCIDENCIA SUPERIOR AL 4%. EN NARANJA, CONTAMINANTES CON INCIDENCIA SUPERIOR AL 9% (* = ANALITOS

Principio activo	Familia	Efluente hospitalario (µg/L)			Concentración teórica en influente EDAR Galindo (µg/L) debida al vertido hospitalario		
		Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio
Enalaprilo	Inhibidor de la enzina convertidora de angiotensina (inhibidor ACE)	3,52	< 0,10	0,61	0,020	-	0,003
Paracetamol	Analgésico	65,57	< 0,10	4,36	0,367	-	0,024
Propofol	Anestésico	0,48	< 0,10	0,13	0,003	-	0,001
Ciproflaxocino	Antibiótico	74,10	0,81	18,63	0,415	0,005	0,104
Eritromicina*	Antibiótico	37,31	< 0,10	1,87	0,209	-	0,010
Norfloxacina	Antibiótico	9,22	< 0,10	1,64	0,052	-	0,009
Sulfametoxazol	Antibiótico	11,30	< 0,10	2,56	0,063	-	0,014
Trimetropina	Antibiótico	8,71	< 0,10	1,37	0,049	-	0,008
Carbamazepina	Antiepiléptico	0,71	< 0,10	0,11	0,004	-	0,001
Fenitoina	Antiepiléptico	0,46	< 0,10	< 0,10	0,003	-	-
Desketoprofeno	Antiinflamatorio	16,42	1,30	7,43	0,092	0,007	0,042
Diclofenaco	Antiinflamatorio	6,08	< 0,10	0,35	0,034	-	0,002
Ibuprofeno	Antiinflamatorio	17,10	< 0,10	6,69	0,096	-	0,037
Indometacina	Antiinflamatorio	0,23	< 0,10	< 0,10	0,001	-	-
Naproxeno	Antiinflamatorio	4,60	< 0,10	0,73	0,026	-	0,004
Bezafibrato	Antilipídico	26,50	< 0,10	2,33	0,148	-	0,013
Gemfibrocilo*	Antilipídico	33,10	< 0,10	1,58	0,185	-	0,009
Atenolol	Beta bloqueante	7,23	< 0,10	0,88	0,040	-	0,005
Bisopoolol	Beta bloqueante	1,16	< 0,01	0,17	0,006	-	0,001
Propanolol	Beta bloqueante	16,70	< 0,10	4,68	0,093	-	0,026
PFBS	Desinfectante	22,32	< 0,10	1,13	0,125	-	0,006
PFOA	Desinfectante	268,12	< 0,10	21,26	1,500	-	0,119
PFOS	Desinfectante	132,04	< 0,10	6,73	0,739	-	0,038
AM - anfetamina	Droga	24,60	< 0,10	6,12	0,138	-	0,034
BE - benzoilecgonina	Droga (metabolito de la cocaína)	1,73	< 0,10	0,37	0,010	-	0,002
CO - Cocaína	Droga	0,04	< 0,01	< 0,01	0,000	-	-
COD . codeína	Droga	0,46	< 0,01	0,12	0,003	-	0,001
EDDP	Droga (metabolito de la metadona)	3,83	< 0,10	0,36	0,021	-	0,002
EPH - (1S,2R-(+)-efedrina hidrocloruro	Droga	0,76	< 0,10	< 0,10	0,004	-	-
Metadona	Droga	3,07	< 0,08	0,82	0,017	-	0,005
OH-THC - 11-hydroxy-THC	Droga	4,00	< 0,10	0,49	0,022	-	0,003
Iomeprol	ICM (agente de contraste de rayos X)	3.150,00	42,43	817,35	17,624	0,237	4,573
Cafeína	Estimulante	133,11	12,50	68,05	0,745	0,070	0,381

LA EDAR DE GALINDO REALIZADOS EN 2011 Y ESTIMACIÓN DE LA INCIDENCIA DEL VERTIDO HOSPITALARIO EN EL INFLUENTE DE LA EDAR. EN DONDE UNO DE LOS VALORES ANALIZADOS ES EXCEPCIONAMENTE ELEVADO CON RESPECTO AL RESTO DE ANÁLISIS).

	Concentración real analizada en influente EDAR Galindo ((µg/L)			Concentración real analizada en efluente EDAR Galindo ((µg/L)			% de las concentraciones estimadas del vertido hospitalario respecto influente analizado EDAR Galindo ((µg/L)
	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Promedio
	0,45	0,30	0,37	< 0,10	< 0,10	< 0,10	0,92
	1,22	< 0,01	0,25	< 0,10	< 0,10	< 0,10	9,77
	0,83	< 0,10	0,27	2,12	< 0,10	< 0,10	0,27
	4,67	0,64	2,51	0,53	< 0,10	0,72	4,15
	0,53	< 0,10	0,11	1,91	< 0,10	< 0,10	9,53
	4,34	0,28	1,76	0,78	< 0,10	0,48	0,52
	0,62	< 0,10	0,33	0,85	< 0,10	0,25	4,34
	< 0,10	< 0,10	< 0,10	0,19	< 0,10	0,13	-
	0,20	< 0,10	< 0,10	0,57	< 0,10	< 0,10	-
	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	-
	1,05	0,41	0,91	2,98	< 0,10	< 0,10	4,57
	1,50	0,19	0,74	0,21	0,08	0,73	0,26
	19,50	7,80	13,51	-	< 0,10	< 0,10	0,28
	-	-	-	0,32	-	-	-
	2,70	1,26	2,00	0,18	< 0,10	0,12	0,21
	0,68	0,17	0,52	< 0,10	< 0,10	< 0,10	2,50
	11,80	< 0,10	2,36	0,34	< 0,10	< 0,10	0,37
	1,77	0,17	0,82	0,18	< 0,10	0,11	0,60
	0,37	< 0,01	0,16	0,66	< 0,10	< 0,10	0,61
	4,56	2,01	2,68	19,70	< 0,10	0,17	0,98
	0,06	< 0,01	0,01	1,72	< 0,01	4,64	63,06
	2,52	0,08	0,73	0,36	< 0,01	0,35	16,30
	0,52	0,08	0,33	0,36	< 0,01	0,15	11,40
	9,40	< 0,10	1,88	4,07	< 0,10	1,01	1,82
	3,77	3,47	3,04	1,30	< 0,10	0,56	0,07
	-	-	-	-	-	-	-
	0,46	< 0,10	0,15	0,29	< 0,10	< 0,10	0,43
	0,34	< 0,10	< 0,10	0,34	< 0,10	0,11	-
	-	-	-	-	-	-	-
	1,'5	< 0,10	0,29	0,46	< 0,10	0,25	1,57
	2,16	< 0,10	0,43	< 0,10	< 0,10	< 0,10	0,63
	67,20	< 0,10	27,32	21,90	< 0,10	7,40	16,74
	54,60	33,40	39,44	0,28	< 0,10		0,97

medio receptor. No obstante, la implementación de los tratamientos en las EDAR está siendo todavía cuestionada por el elevado volumen de aguas a tratar, las concentraciones relativamente bajas y el elevado coste de explotación. La búsqueda de fuentes puntuales de entrada en la red de saneamiento y su tratamiento en origen es algo que se debería tener en cuenta para la consecución de este objetivo, siguiendo los posicionamientos de EUREAU [13].

6. CONCLUSIONES

Este estudio permite confirmar la presencia de contaminantes emergentes, su grado de eliminación en el tratamiento biológico convencional de una EDAR urbana y también que los tratamiento terciarios convencionales son efectivos para la eliminación de una gran parte de los compuestos detectados.

Así mismo, se constata que el vertido hospitalario de los 9 centros que vierten a la EDAR de Galindo, pese a representar tan solo el 0,56% del caudal tratado en la depuradora, en algunos contaminantes son responsables de valores por encima del 4% (alcanzando algunos de ellos porcentajes de dos órdenes de magnitud) de la concentración media detectada en el influente de la planta depuradora. Entre dichas sustancias destacan los desinfectantes, algunos antibióticos y el reactivo de contraste de rayos X iomeprol. Para otros muchos contaminantes emergentes el principal origen está en el uso diario que realiza la población, por lo que un uso racional de los productos que originan los contaminantes redundará en una reducción de las concentraciones detectadas en las aguas residuales.

Algunos de estos contaminantes, como los desinfectantes PFOS detectados en importantes concentraciones en el vertido hospitalario, ya están sujetos a Normas de Calidad Ambiental en el medio receptor por ser sustancias prioritarias, con lo que pueden condicionar los límites de vertido de las EDAR y puede ser necesario un tratamiento de eliminación adicional previo a su vertido. Otros contaminantes están en fase de revisión, y a futuro puede verse ampliada la lista de sustancias prioritarias.

La implementación de los tratamientos en las plantas depuradoras se complica por el elevado volumen de aguas a tratar. Por ello, la reducción en origen de la carga contaminante, frente al tratamiento de contaminantes emergentes en EDAR 'fin de tubo', es la solución menos costosa y ambientalmente más sostenible. Siguiendo este criterio en Dinamarca ya han actuado sobre los vertidos del hospital Herlev, mediante tratamientos avanzados que alcanzan rendimientos de eliminación del 99%.

Con carácter general, para la reducción de los contaminantes en origen, se proponen las siguientes actuaciones:

- Evaluación ambiental de los fármacos antes de su puesta en el mercado y sustitución de aquellos más perjudiciales para el medio ambiente.
- Aplicación de la legislación REACH a estos compuestos.
- Fomentar la educación y buenas prácticas entre productores, distribuidores y consumidores para un uso racional de los mismos.
- Proporcionar tratamiento específico en uno de los principales focos emisores: los hospitales.

7. RECONOCIMIENTOS

Los autores dan las gracias a la Agencia Vasca del Agua (URA) por la financiación del trabajo, realizado por Tekniker, bajo los acrónimos de proyecto CONTEMERGENTES y FARMA. Asimismo, se agradece la colaboración del Hospital de Galdakao y de la empresa SAIlab para el desarrollo y puesta a punto del método analítico.

Bibliografía

[1] Barceló, D. (2003). TrAc Trends Anal. Chem.22 (10) xiv-xvi.

[2] Benotti, M.J.; Trendholm, R.A.; Vanderford, B.J.; Holady, J.C.; Stanford, B.D.; Snyder, S.A. (2009). Environ.Sci. Technol., núm. 43, págs. 597.

[3] Postigo, C.; Gros, M.; Kuster, M.; Petrovic, M.; López de Alda, M.; Barceló, D. (2008). Plataforma del Agua (dic.), 303.

[4] Bolong, N.; Ismail A.F.; Salim, M.R.; Matsuura, M. (2009). Desalination, núm. 239, pág. 229.

[5] Kuehn, B.M. (2008). J. Am. Med. Assoc., núm. 299(17).

[6] European Commission (DG Environment) Technical Support for the Impact Assssment of the Review of Priority Substances under Directive 2000/60/EC.(2012)

[7] Holt, P.K.; Barton, G.W.; Mitchell, C.A.; (2005). Chemosphere, núm. 59:355, pág. 199.

[8] Klamerth, N.; Rizzo, L.; Malato, S.; Maldonado, M.I.; Agüera, A.; Fernández-Alba, A.R. (2010). Water Res., núm. 44, págs. 545.

[9] Petrovic, M.; Elijarrat, E.; López de Alda, M.J.; Barceló, D. (2004). Anal. Bioanal. Chem., núm. 378, pág. 579.

[10] Petrovic, M.; Gonzales, S.; Barceló, D. (2003). TrAc Trends Anal. Chem., núm. 22(10), pág. 685.

[11] Verlicchi, P. *et al*. (2010). Journal of Hidrology, núm. 389, pág. 416.

[12] Hospital Herlev (Dinamarca): http://www.janusinfo.se/Documents/Fortbildning/Ulf%20Nielsen.pdf [fecha consulta 22/11/2017]. https://www.herlevhospital.dk/nythospitalherlev/nyheder-og-presse/fotos/Documents/Private-Public%20Innovation%20Project.pdf [Fecha consulta 22/11/2017].

[13] EUREAU. Position Paper Source Control for Micropollutants: http://www.eureau.org/administrator/components/com_europublication/pdf/63ffd2b6432094f92ff50cea0d0c293e-20160527-EurEau-Position-Paper-Source-Control-for-Micropollutants-final.pdf [fecha consulta 22/11/2017].