

**Resumen**

El abastecimiento de agua a nuestra sociedad, en un marco social e industrial con demandas crecientes tanto en cantidad como en calidad, y bajo una situación climática muy irregular, hace que se deban poner en carga todos los recursos disponibles. A las tradicionales fuentes de captación de aguas continentales superficiales y subterráneas, se les unen desde hace varios años con fuerza las aguas salobres (vía desalación) y las aguas regeneradas procedentes de la depuración precedente de aguas usadas. En este sentido, el empleo práctico de las aguas regeneradas debe apoyarse en tres pilares básicos: la normativa aplicable sobre reutilización de aguas, la existente sobre vertidos a cauces públicos y los procesos técnicos de regeneración de aguas disponibles.

**Palabras claves:**

Agua residual, agua depurada, agua reutilizada..

**Abstract***About the use and treatment of reclaimed wastewater*

Demand of water in our actual society is increasing each day. Taking into account the irregular climatic situation experienced in a lot of zones of Spain, it is necessary to use all the available resources. Among the conventional resources of sweet waters (surface and underground), we must pay attention to the desalted waters and to the reclaimed wastewater. In this way, the practical use of reclaimed wastewater must be supported in three basic items: normative about reusing of reclaimed wastewater, that of treated wastewater and effluents discarded to natural environment and finally, treatment processes to reclaim wastewater.

**Keywords:**

Wastewater, treated wastewater, reclaimed wastewater.

# El reto de la reutilización de aguas usadas: tratamiento intensivo de aguas residuales

Por **Rafael Marín Galvín**, jefe de control de calidad, calidad y Medio Ambiente

**EMACSA - EMPRESA MUNICIPAL DE AGUAS DE CÓRDOBA**

Calle de los Plateros, 1

14006 Córdoba

Correo-e: [rmargal@emacsa.es](mailto:rmargal@emacsa.es)

**1. Introducción**

La disponibilidad de agua en nuestra sociedad occidental es sin duda elemento crítico para su mantenimiento y desarrollo. Se manejan datos que establecen, por ejemplo para nuestro país, cifras en torno a los 150 L/hab y día de consumo medio de agua potable [1]. En todo caso, debe hacerse el inciso de que, en los últimos 10 años, se ha comprobado en todos los abastecimientos del Estado un descenso apreciable en los consumos urbanos de agua debido, probablemente, a las siguientes causas:

- Descenso de la actividad industrial (principal consumidor del agua urbana).
- Optimización del uso y reutilización interna del agua en las industrias.
- Fuerte concienciación en el ahorro del agua por parte del ciudadano.
- Aplicación de técnicas más eficientes en el uso del agua también a nivel doméstico.

Matizado lo anterior, el dato de consumo medio indicado más arriba supone para un abastecimiento de una ciudad media (unos 325.000 habitantes) la necesidad de disponer del orden de 20 hm<sup>3</sup> al año. Cuando el abastecimiento en cuestión tiene a su disposición fuentes de recursos convencionales, por ejemplo, agua

superficial (embalses o ríos, situación mayoritaria en España —del orden del 70% sobre total—) será necesario contar con un aporte anual igual como mínimo, al gasto al año para mantener la actividad social e industrial. Y se dice como mínimo porque al recurso natural, además de lo detraído en función del consumo, habrá que sumarle la cantidad de agua 'perdida' por la fuente de captación por causas meramente naturales como evaporaciones y filtraciones, además de las 'pérdidas' sobrevenidas como usos agroganaderos, otros usos industriales, incluso los derivados de trasvases intercuenas que podrían llevarse a efecto en su momento.

Con estos datos puede concluirse que para renovar la fuente de captación concreta deben probablemente producirse unos aportes anuales de unos 25 a incluso 35 hm<sup>3</sup>. Si se considera un río o embalse, su única fuente natural de aporte de aguas serán las lluvias y episodios relacionados (escorrentías). Finalmente, introdúzcase en nuestro razonamiento otro factor importante: todas las estadísticas disponibles de los últimos 25-30 años indican un progresivo descenso en la cantidad de lluvias registradas en nuestras latitudes del orden del 5-15%, situación que se

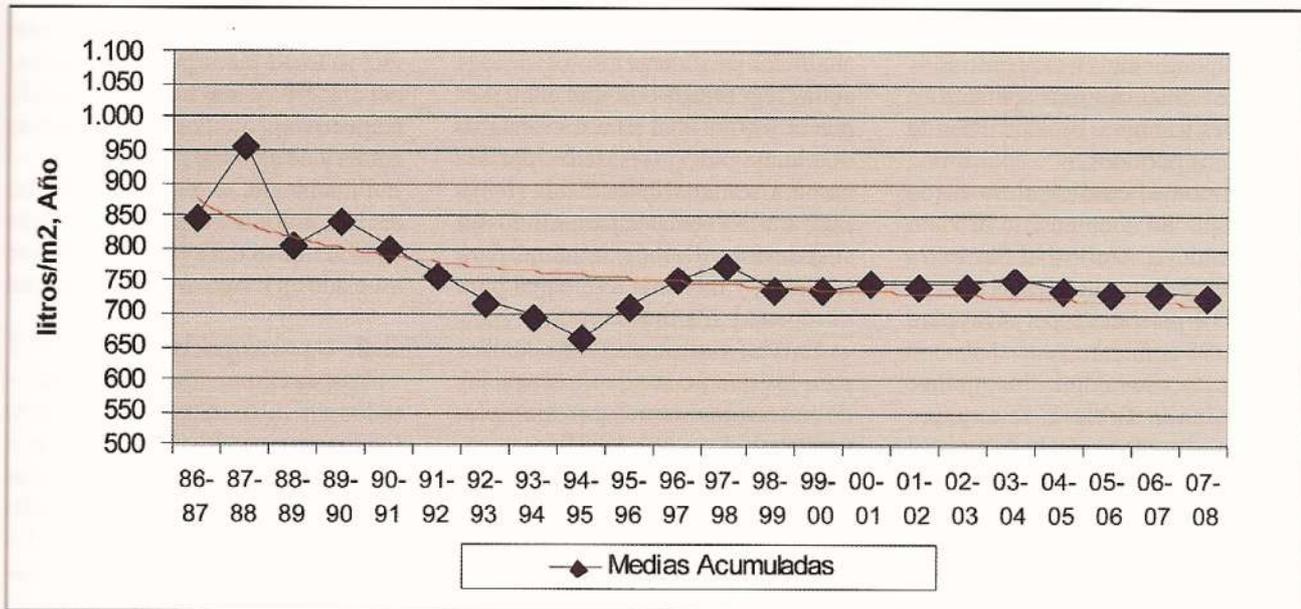


Figura 1. Histórico de lluvias en la Sierra de Córdoba (1986-2008): en rojo línea de tendencia.

mantendrá en un futuro próximo a consecuencia del calentamiento global del planeta (no entramos en otras valoraciones de probables causas al efecto). Como ejemplo, los registros de lluvias en la Sierra de Córdoba en el período 1986-2008 (Figura 1).

Establecido este marco en cierto modo sombrío, y contando con la optimización y racionalización en el uso del agua potable, hay que progresar en la posibilidad de poner en valor otras fuentes no convencionales de aprovechamiento de aguas: aguas procedentes de desalación y las procedentes de la reutilización de aguas usadas.

Si bien el entorno del posible incremento de uso de aguas desaladas se circunscribe a las zonas costeras del Estado por motivos obvios, la posibilidad de emplear aguas regeneradas procedentes de depuración para determinados usos se extiende a todo el territorio nacional. Respecto a esto, se manejan tasas del orden del 75% como las de 'conversión' de las aguas consumidas por una comunidad (uso urbano, doméstico+industrial) y que se transforman en aguas usadas [8]. Aplicando un sencillo cálculo al ejemplo de partida, unos 15 hm<sup>3</sup> serían los generados por nuestra ciudad media como aguas residuales, y consiguiendo, los convertibles so-

bre el papel en aguas susceptibles de reutilización. Y estos volúmenes no están mediatizados por la climatología salvo en períodos de muy extrema sequía, puesto que ante situaciones de pocos recursos en la fuente en origen, habitualmente se detraerían aguas de otras procedencias para garantizar como prioritario el consumo humano.

Con este sencillo planteamiento lo único que estamos fundamentando es la 'obligación' ética y práctica de proceder a una política enfocada a incentivar el uso de aguas regeneradas, puesto que el caudal de las mismas no viene tan afectado como los caudales disponibles a escala natural, por factores climáticos poco controlables.

El objetivo de este artículo será el de pasar revista a los tres pilares básicos de una panorámica que contemple la potenciación de las aguas regeneradas: normativa de reutilización vigente [10], normativa general sobre vertidos [11], y finalmente, tecnologías de tratamiento intensivo de aguas residuales con las que se pueden contar, tanto en el caso de que la depuración biológica convencional no se muestre tan eficaz como se requiera, como en la situación del tratamiento terciario o de afino de aguas residuales [3,4].

## 2. Reutilización de aguas

Tras muchas vicisitudes, acaso más de las necesarias dada la necesidad del tema, en diciembre de 2007 se publicó el RD 1620/2007 [10], el cual estableció el marco jurídico por el que se rige en nuestro país el tema de la reutilización de aguas depuradas. La gestión del documento fue larga, laboriosa y no exenta de tensiones puesto que de una parte había que considerar los aspectos meramente técnicos, de otra los administrativos y finalmente, había que contar con la inexcusable salvaguarda de la seguridad sanitaria y toxicológica del agua regenerada.

Comentando brevemente el documento, en él se establece que la reutilización de aguas requerirá una concesión administrativa (otorgada por cada Organismo de Cuenca) como forma de controlar al sector. Se marcan después los usos admitidos y los prohibidos de las aguas regeneradas. Así pues, como usos específicamente prohibidos se especifican:

- El consumo humano.
- Usos en industria alimentaria.
- Instalaciones hospitalarias y similares.
- Cultivo de moluscos filtradores en acuicultura.
- Uso recreativo en baños.
- Torres de refrigeración y condensadores evaporativos, en general,

salvo lo indicado en el apartado correspondiente a usos permitidos que se comentará más adelante.

- Fuentes y láminas ornamentales de edificios públicos.
- Finalmente, cualesquiera otros usos que no cuenten con el visto bueno de la Autoridad Sanitaria por representar un riesgo para la salud de personas o perjuicio para el medio ambiente.

Para los usos admitidos, que se recogen en la **Tabla 1**, se requiere informe vinculante de la Autoridad Sanitaria sobre la idoneidad del uso propuesto y sobre los riesgos derivados del mismo. Se establecen, pues, cinco usos admitidos que son: uso urbano; uso agrario; uso industrial; uso recreativo; uso ambiental.

Cada uso está dividido en varios grupos atendiendo a la calidad requerida para cada actividad específica. De este modo, y en general, los parámetros de calidad que se tienen en cuenta para un agua depurada susceptible de reutilización son: nemátodos intestinales, *Escherichia coli*, sólidos en suspensión, turbidez, nitrógeno total y fósforo total, así como otros contaminantes específicos que puedan ser establecidos por el Organismo de Cuenca atendiendo a cada situación concreta.

A destacar la obligatoriedad de llevar a cabo análisis de *Legionella* (tres veces por semana) cuando el agua reutilizada sea empleada en industrias alimentarias (servicios no

en proceso). Las frecuencias de las analíticas periódicas a someter a las aguas regeneradas oscilan entre: semanal y quincenal para los nemátodos intestinales; tres veces por semana a semanal para *Escherichia coli*; diaria a semanal para sólidos en suspensión; diaria a semanal para turbidez, y mensual a semanal para nitrógeno y fósforo.

Existen varias categorías de usos para los que no se fijan frecuencias de muestreos, como por ejemplo, para algunos usos industriales y ambientales en el caso de nemátodos intestinales y turbidez, para algún uso ambiental en el caso de *Escherichia coli*, y para varios usos urbanos, agrarios, industriales y recreativos, para nitrógeno y fósforo totales. En concreto, para mantenimiento de humedales, caudales ecológicos y similares no se fija ningún tipo de control ni de muestreo.

Desde la óptica de la calidad del agua reutilizada para cada grupo de usos establecidos podemos hacer el siguiente resumen:

### 2.1. Usos urbanos

Para nemátodos intestinales se fija un límite paramétrico de 1 huevo por cada 10 L para todos los usos, mientras que para *Escherichia coli* se marcan 0 colonias/100 mL para usos residenciales, y 200 colonias/100 mL para usos de servicios.

Los sólidos en suspensión se admiten hasta 10 mg/L en usos resi-

denciales y hasta 20 mg/L para servicios. La turbidez puede ser de hasta 2 UNF y de hasta 10 UNF, respectivamente para usos residenciales y de servicios.

Finalmente, se marca un máximo de 100 colonias/L para *Legionella* cuando el uso del agua podría llevar asociado un riesgo de aerosolización.

### 2.2. Usos agrícolas

En este caso se fija para los nemátodos un valor máximo para todos los usos asociados de 1 huevo por cada 10 L. Para *Escherichia coli* los valores admitidos varían entre 100, 1.000 y 10.000 colonias/100 mL dependiendo que los usos sean de categoría 2.1, 2.2 o 2.3 (**Tabla 1**).

El valor límite de sólidos en suspensión se sitúa entre 20 UNF (usos tipo 2.1) y 35 mg/L (resto de usos). Para la turbidez, sólo el uso 2.1 (riego de cultivos con contacto directo agua-cultivo) tiene fijado un límite de 10 UNF. Asimismo, cuando existiesen riesgos de aerosolización, se establecen límites de *Legionella* de 100 colonias/L (usos tipo 2.3) y de 1.000 colonias/L (usos tipo 2.3), así como la detección de patógenos (por ejemplo, *salmonella*) cuando exista reiteración en la detección de *Escherichia coli*, así como la investigación de *Taenia saginata* y *Taenia solium* (1 huevo/L).

Por último, para usos agrícolas se deberá contar con información adicional como conductividad del agua,

**Tabla 1**

1. Uso urbano	1.1. Residencial. Jardines privados. Aparatos sanitarios	1.2. Servicios. Riego zonas verdes. Baldeo calles. Incendios. Lavado vehículos	-	-
2. Uso agrario	2.1. Contacto directo agua-cultivos	2.2. Contacto directo agua-productos. Riego pastos. Acuicultura	2.3. Cultivos leñosos. Flores ornamentales. Cultivos industriales	-
3. Uso industrial	3.1. Aguas proceso y limpieza. Otros usos	3.2. Aguas proceso y limpieza Ind. Aliment.	3.3. Torres refrigeración y condensadores evap.	-
4. Uso recreativo	4.1. Riego campos golf	4.2. Estanques, caudales circulantes no acceso público	-	-
5. Uso ambiental	5.1. Recarga acuíferos por percolación	5.2. Recarga acuíferos por inyección	5.3. Riego bosques y similares Silvicultura	5.4. Humedales, caudales ecológicos

**Tabla 1.** Usos admitidos para aguas reutilizadas (RD 1620/2007).

relación de adsorción de sodio, y algunos metales (B, As, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Se y V) para los que se les fijan valores paramétricos máximos que oscilan entre mínimos de 0,01 mg/L para Cd y Mo, y un máximo para B de 0,5 mg/L, estando el resto de metales comprendidos entre estos dos valores.

### 2.3. Usos industriales

En estos casos, los límites para nemátodos se sitúan en 1 huevo/10 L, excepto para uso en procesos y limpiezas en industrias no alimentarias y otros usos industriales (tipo 3.1). Para *Escherichia coli* se fijan límites de 10.000 colonias/100 mL (tipo 3.1), 1.000 colonias/100 mL (aguas usadas en industria alimentaria) y llegando a fijar ausencia en el caso de torres de refrigeración y condensadores evaporativos.

Para los sólidos en suspensión se establece un máximo de 5 mg/L en torres de refrigeración y condensadores, y de 35 mg/L para el resto de usos. Para el parámetro turbidez, no se fijan límites en agua usadas en industrias alimentarias, admitiéndose hasta 1 UNF en torres de refrigeración y condensadores, y hasta 15 UNF en el resto de usos.

Por último, se admiten hasta 100 colonias/L de *Legionella* en aguas de proceso y limpiezas industriales, mientras se exige ausencia de este microorganismo para torres de refrigeración y condensadores evaporativos.

### 2.4. Usos recreativos

Aquí se admite hasta 1 huevo de nemátodos por cada 10 L de agua para riego de campos de golf, no fijándose límite para los otros usos recreativos. Con respecto a *Escherichia coli* se admiten hasta 200 colonias/100 mL para campos de golf, y hasta 10.000 colonias/100 mL para el resto de usos. En el caso de sólidos en suspensión el límite para campos de golf es de 20 mg/L, y de 35 mg/L para el resto, mientras que para turbidez hablamos de 10 UNF en campos de golf, no se estableciéndose valor límite para el resto de usos.

Finalmente, en campos de golf con riesgos de aerosolización se admiten hasta 100 colonias de *Legionella* por cada L, y en los otros usos recreativos (estanques, masas de agua y caudales circulantes) se considera un máximo para fósforo total de 2 mg/L para aguas estancadas.

### 2.5. Usos ambientales

Para estos usos no se fijan límites de huevos de nemátodos salvo para recarga de acuíferos vía inyección (1 huevo/10 L), ni para turbidez, también excepto para este mismo supuesto con un valor máximo de 2 UNF.

Considerando ahora *Escherichia coli*, no se establecen límites para riegos de bosque, y otros espacios restringidos al público y silvicultura, no admitiéndose ninguna colonia por cada 100 mL para recarga de acuíferos por inyección, y hasta 1.000 colonias/100 mL para recarga de acuíferos mediante percolación.

Como otros criterios aplicables, en el caso de recargas de acuíferos en sus dos modalidades se admiten hasta 10 mg/L de nitrógeno total, y hasta 25 mg/L de nitratos. Finalmente, la calidad del tipo 5.4 (mantenimiento de humedales, caudales ecológicos y similares) será estudiada en cada caso concreto.

Se puede realizar un último comentario común a lo visto hasta ahora: el RD indica que deberán limitarse la entrada al medio de contaminantes, especialmente de sustancias que puedan contravenir las normas de calidad ambiental vigentes (orgánicas, metales pesados..) con lo cual las exigencias pueden verse incrementadas.

Realizando algunas valoraciones globales a la normativa vigente sobre reutilización, indíquese que ya se dispone de la misma, lo cual no es poco, admitiéndose una serie de usos acotados con unas salvaguardas sanitarias y toxicológicas asociadas lo que permite por fin utilizar dentro de la legalidad, un recurso cuya cantidad puede en muchos casos resolver situaciones difíciles.

### 2.6. Otros usos

Hasta ahora se han comentado los usos del agua regulados en la vigente norma, tanto si se trata de usos permitidos como no permitidos. Al objeto de completar el apartado de la reutilización, puede ser adecuado hacer mención de un uso de difícil legislación, pero cuya práctica es de indudable constatación diaria. Se trata de la que podríamos denominar como reutilización indirecta.

Piénsese en el vertido de aguas depuradas, a los niveles que en cada momento se exijan, a un cauce natural que engloba tanto estas aguas como las propias originales. No es infrecuente que después de un cierto tramo de recorrido del cauce se produzca la captación de estas aguas, naturales pero sin duda ya modificadas por el aporte depurado, con destino a una estación potabilizadora. Y esto es una constante pasada y presente. Además, en muchas ocasiones y dado el estado ya degradado del cauce natural, la confluencia de las aguas depuradas no hace sino 'mejorar' el estado fisicoquímico e incluso ecológico de la masa de agua circulante. Como ejemplos, muchos de nuestros grandes ríos en época estival (con caudales mínimos de estiaje) que tras la incorporación de aguas residuales urbanas previamente depuradas en EDAR municipales de cierta entidad, experimentan una notable mejora de calidad que es ostensible en las captaciones de aguas destinadas a potabilización y ubicadas en zonas inferiores de las cuencas hidrográficas (Guadalquivir, Guadiana).

De forma similar y con todas las lógicas salvaguardas sanitarias y toxicológicas necesarias e inexcusables al caso, aplicando las técnicas de afino o tratamiento terciario disponibles actualmente (desarrolladas en el punto posterior 4.2, por ejemplo, ultrafiltración, ósmosis inversa, etc.) estaríamos en condiciones de verter aguas muy puras al medio, tanto fisicoquímica como incluso microbiológicamente, cuyo bombeo hacia puntos suficientemente aguas

arriba de captaciones de aguas destinadas a potabilización, podrían suponer un recurso adicional para el abastecimiento en situaciones de emergencia para muchas colectividades. Nótese que esta situación es conceptual y formalmente idéntica a la habitual de la captación aguas abajo de la incorporación de aguas depuradas a un río.

Cuestión no obstante de sensible regulación que deberá pasar un minucioso tamiz técnico y normativo, y que en ningún caso puede identificarse como una potabilización de aguas depuradas para consumo humano (prohibida por la norma), la reutilización indirecta se está usando en la práctica de forma más o menos consciente en algunas zonas del país, con resultados satisfactorios.

### 3. Vertidos de aguas depuradas: sustancias prioritarias y contaminantes más o menos refractarios a la depuración

Desde hace varios años se ha venido observando en diferentes saneamientos de nuestro país la presencia y detección de cantidades importantes de variados compuestos orgánicos tanto de síntesis, como de posible generación en los propios saneamientos (vía química o biológica) con potencial efecto negativo especialmente sobre los procesos de depuración biológicos posteriormente empleados en la mayoría de nuestras EDAR.

Estos compuestos, del tipo de plaguicidas, fitosanitarios, disolventes orgánicos, restos de medicamentos, metales pesados, etc., pueden ser especialmente refractarios a su depuración biológica con los consiguientes problemas, tanto de explotación, como de incumplimientos de normativas vigentes sobre vertidos de aguas depuradas a cauces públicos que son de obligado cumplimiento. Asimismo, teniendo en cuenta la creciente tendencia en la reutilización de aguas residuales regeneradas en geografías tradicionalmente secas como la mayoría del te-

rritorio nacional, la presencia de estas sustancias puede implicar serias restricciones a esta práctica.

Como preámbulo a este complejo tema indíquese que los contaminantes que puede englobar un agua residual pueden ser tan variados como la propia actividad humana: compuestos orgánicos alifáticos y aromáticos, compuestos de síntesis, compuestos generados en reacciones químicas más o menos complejas dentro de los propios saneamientos, plaguicidas y afines, sustancias de origen médico-farmacéutico, y productos de uso doméstico, considerando además los metabolitos que pueden generarse a partir de todos ellos.

Por otro lado, considerando que las aguas residuales industriales son objeto de seguimiento sistemático por parte de los gestores de los saneamientos públicos [2] y que pueden contar además, con sistemas eficaces de control a fin de limitar estas emisiones (Ordenanzas de Vertidos y similares) [9] la problemática de las aguas domésticas, emitidas desde domicilios particulares y no sujetas a más restricción que la del propio usuario, podría posibilitar incrementos importantes de contaminantes de difícil eliminación en EDAR biológicas convencionales. En cualquier caso, otro tema accesorio sería el de la acumulación de contaminantes potencialmente nocivos en los subproductos de depuración (biosólidos o fangos) impidiendo o limitando su posterior aprovechamiento agrícola, por ejemplo, o en general su gestión final.

Recientes datos publicados [3,6] demuestran que el origen de muchos contaminantes no convencionales de nuestras aguas residuales urbanas tiene clara procedencia doméstica, aparte en su caso, de su origen industrial. Algunos casos concretos serían:

- Naftaleno y fluoranteno: procedentes de la combustión de vehículos automóviles y del asfaltado de nuestras calles.
- Difeniléteres bromados: ligados a pinturas y barnices de uso doméstico.

- Ftalatos: procedentes de las propias tuberías de PVC, así como de recubrimientos de construcción y de tejidos.
- Plomo: emitido por lavadoras domésticas.
- Mercurio: esmaltes dentales.
- Diruón, isoproturón: empleado como plaguicida tanto doméstico como en jardinería municipal.
- Cloroformo: que ya se encuentra en las propias aguas residuales domésticas, ligado a la cloración de nuestras aguas de consumo.

Esta cuestión se torna particularmente importante habida cuenta de la muy reciente publicación de la Directiva 2008/105/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre normas de calidad ambiental en el ámbito de las aguas [11]. Esta Directiva marca modificaciones notables con relación a normativas anteriores, siendo de especial relevancia la actualización del listado de las sustancias consideradas actualmente como prioritarias en las aguas de la Unión Europea, y la fijación de niveles tanto de concentraciones máximas admisibles como de concentraciones medias anuales para todas las aguas europeas, distinguiendo aquí entre aguas superficiales (ríos, lagos, y aguas artificiales o modificadas) y otras aguas superficiales (estuarios y aguas de transición).

En este sentido, se consideran un total de 33 sustancias, entre compuestos orgánicos, fitosanitarios y metales pesados, a cuyas concentraciones en aguas superficiales se les fijan determinados niveles (Tabla 2).

Pasando breve revista a las sustancias prioritarias, puede observarse que en el caso de los metales pesados, sus concentraciones medias anuales permitidas oscilan entre los 0,0002 µg/L para compuestos orgánicos de estaño y los 20 µg/L para el níquel y sus compuestos. En el caso de los compuestos aromáticos policíclicos los valores van desde los 0,001 µg/L para benzo-pireno e indeno-pireno, y los 2,4 µg/L para nafataleno.

Si consideramos los plaguicidas nitrogenados, sus límites varían entre

Tabla 2

Compuesto o grupo de compuestos	Conc. media anual $\mu\text{g/L}$		Conc. máxima anual $\mu\text{g/L}$	
	(a)	(b)	(a)	(b)
Alcilo	0,3	0,3	0,7	0,7
Antraceno	0,1	0,1	0,4	0,4
Atrazina	0,6	0,6	2,0	2,0
Benceno	10	8	50	50
Difeniléteres bromados	0,0005	0,0002	NA	NA
Cadmio y sus compuestos	$\leq 0,08$ a 0,25	0,2	$\leq 0,45$ a 1,5	$\leq 0,45$ a 1,5
Tetracloruro de carbono	12	12	NA	NA
Cloroalcanos C10- C13	0,4	0,4	1,4	1,4
Clorfenvinfós	0,1	0,1	0,3	0,3
Clorpirifós (clorpirifós etil)	0,03	0,03	0,1	0,1
Aldrín, dieldrín, endrín, isodrín	0,01 (p.u.)	0,005 (p.u.)	NA	NA
DDT total	0,025	0,025	NA	NA
$\gamma$ -p-DDT	0,01	0,01	NA	NA
1,2-dicloroetano	10	10	NA	NA
Diclorometano	20	20	NA	NA
Di (2-etilhexil) ftalato	1,3	1,3	NA	NA
Diurón	0,2	0,2	1,8	1,8
Endosulfán	0,005	0,0005	0,01	0,004
Fluoranteno	0,1	0,1	1	1
Hexaclorobenceno	0,01	0,01	0,05	0,05
Hexaclorobutadieno	0,1	0,1	0,6	0,6
Hexaclorociclohexano	0,02	0,002	0,04	0,02
Isoproturón	0,3	0,3	1,0	1,0
Plomo y sus compuestos	7,2	7,2	NA	NA
Mercurio y sus compuestos	0,05	0,05	0,07	0,07
Naftaleno	2,4	1,2	NA	NA
Níquel y sus compuestos	20	20	NA	NA
Nonilfenol (4-nonilfenol)	0,3	0,3	2,0	2,0
Octilfenol	0,1	0,01	NA	NA
Pentaclorobenceno	0,007	0,0007	NA	NA
Benzo (a) pireno	0,05	0,05	0,1	0,1
Benzo (b) fluoranteno+Benzo (k) fluoranteno	0,03	0,03	NA	NA
Benzo (g, h, i) perileno+Indeno (1, 2, 3-cd) pireno	0,002	0,002	NA	NA
Simazina	1	1	4	4
Tetracloroetileno	10	10	NA	NA
Tricloroetileno	10	10	NA	NA
Compuestos de tributilestano	0,0002	0,0002	0,0015	0,0015
Triclorobencenos	0,4	0,4	NA	NA
Triclorometano	2,5	2,5	NA	NA
Trifuralina	0,03	0,03	NA	NA

Tabla 2. Normas de calidad ambiental para sustancias prioritarias (Directiva 2008/105/CE).  
 (a) Aguas superficiales; (b) Otras aguas superficiales; NA: no aplicable.

los 0,6 µg/L de la atrazina y los 4,0 µg/L de la simazina. Incluso dentro de estos compuestos están varios que se incluyen dentro de los criterios de calidad del agua de consumo, como por ejemplo tetracloroetileno y tricloroetileno, a los que se les fijan concentraciones medias anuales en aguas superficiales de 10 µg/L. Finalmente, las sustancias a las que se les fija una más baja concentración de todas las consideradas son los compuestos de tributilestano (ya comentados más arriba) mientras que para el benceno se fija la concentración máxima anual más alta con 50 µg/L.

Por último, la directiva considera asimismo otros compuestos cuya adscripción a la categoría de sustancias prioritarias parece próxima: AMPA (ácido aminometil fosfónico), bentazon, bisfenol A, dicofol, EDTA, cianuro libre, glifosato, mecoprop, almizcle xileno, ácido de perfluoro-octán-sulfonato, así como quinoxifeno, dioxinas y PCB (poli-cloro benceno).

Como una primera valoración de las concentraciones recogidas más arriba cabe indicar, que necesariamente implicarán la paralela reducción, o incluso la prohibición, de verter a nuestros saneamientos desechos que puedan contener las sustancias limitadas, habida cuenta de la complejidad de su reducción o minimización a los límites exigibles una vez accedan a una EDAR convencional para una gran parte de las sustancias consideradas. Debe insistirse nuevamente, que la solución a esta cuestión debe pasar por un control en origen de las sustancias, puesto que muchas de ellas están ligadas claramente a actividades esencialmente domésticas (aseo personal, cosméticos, limpieza doméstica, medicamentos, etc.) [3,6].

En cualquier caso, la presencia de estas sustancias de elevado potencial contaminante en un agua depurada, que posteriormente se pretende reutilizar, llevará asociada la aplicación de tecnologías de tratamiento intensivas para eliminar o reducir su contenido a niveles de comprobada

inocuidad para el posterior uso de esa agua.

#### 4. Tecnologías de tratamiento de aguas residuales

##### 4.1. Depuración biológica convencional

Ya se comentó más arriba que la depuración biológica convencional puede no ser en ocasiones lo eficaz que se requiera frente a la presencia en un agua residual urbana de compuestos del tipo de sustancias orgánicas (de síntesis o no), plaguicidas, sustancias prioritarias, disolventes, metales pesados, etc. Indíquese que al referirnos a eficacia, debe tenerse en cuenta tanto que la tasa de eliminación de un compuesto sea baja, como que aunque aquella sea elevada, la presencia de concentraciones considerables de un determinado compuesto hagan que el residual generado tras su tratamiento biológico convencional no sea aplicable.

En este sentido, puede pasarse revista a modo de introducción a este apartado, al comportamiento de una EDAR convencional (fangos activos) frente a sustancias prioritarias y compuestos más o menos refractarios a la depuración [6]. En resumen, la eliminación de este tipo de compuestos suele ocurrir, además de por acción microbiológica aerobia, por fenómenos de adsorción sobre materias en suspensión e incluso sobre materia viva, y mediante stripping, este último debido a la elevada volatilidad de las sustancias consideradas.

Comenzando por los HAP y compuestos patrón y siempre en función de los autores consultados [6] una EDAR convencional que opere por fangos activos puede eliminar más del 80% de benceno, del orden del 70% o más de naftaleno y fluoranteno, y entre el 30 y el 80% de antraceno. En el caso del resto de HAP, se han informado sobre tasas de eliminación entre el 50% y el 78%.

Por otro lado, la eliminación de compuestos orgánicos volátiles (VOC) suele situarse entre el 50 y el

90% para cloroformo, diclorometano y dicloroetano.

En el caso de los clorobencenos, compuestos empleados en la producción de productos variados, como diversos herbicidas, pigmentos, disolventes, lubricantes y otros, se han informado sobre tasas de reducción de entre el 70% y más del 90%

Cuando se consideran compuestos como el pentaclorofenol y el hexaclorociclohexano e isómeros, de amplia utilización en formulaciones de plaguicidas y fungicidas, se han informado sobre tasas de eliminación comprendidas entre el 40% y casi el 90%.

Para los herbicidas de la familia de la fenil-urea (diruón e isoproturón) empleados en cultivos de frutas, trigo, alfalfa, plantas de jardín, así como para el control de malas hierbas en general, no parecen conseguirse tasas de eliminación significativas, siendo siempre inferiores al 10% en EDAR de fangos activos.

Otros herbicidas de amplio espectro y ampliamente empleados en muchos cultivos como son las S-triazinas (por ejemplo, simazina, de uso recientemente restringido) experimentan muy bajas tasas de reducción en plantas biológicas convencionales. Así, para atrazina y simazina, nunca parecen alcanzarse eliminaciones superiores al 40%, no superando en muchos estudios la tasa del 10%.

Con respecto a los insecticidas de la familia de los organofosforados, empleados tanto para usos agrícolas como domésticos, el clorpirifos no se degrada biológicamente, mientras que para el clorfenvinfos la bibliografía ofrece datos contradictorios, no presentando biodegradabilidad en algunos estudios y alcanzándose en otros, tasas de eliminación de más del 80%.

Para finalizar esta revisión de plaguicidas, el endosulfán, pesticida de la familia del ciclohexeno parece presentar tasas de eliminación comprendidas entre el 45% y el 95%.

Considerando ahora el amplio grupo de los denominados disruptores endocrinos, los nonil y octilfeno-

les, que entran en formulaciones de detergentes domésticos, cosméticos y productos textiles, pueden degradarse entre el 30% y el 95% a lo largo de una EDAR convencional biológica, dependiendo del autor consultado. Los ftalatos, usados como aditivos en plásticos, fabricación de pinturas, cosméticos y pesticidas, parecen ser eliminados en tasas comprendidas entre el 78% y más del 90%, mediante fangos activos.

Los últimos compuestos considerados como disruptores endocrinos, en este caso los difeniléteres bromados, empleados como retardantes de llama pueden ser eliminados vía convencional en más de un 90% con respecto a su contenido inicial.

Podemos fijarnos ahora en el amplio campo de los metales pesados, en realidad los primeros compuestos contaminantes estudiados en profundidad en las aguas residuales urbanas e industriales. El cadmio, material usado en pigmentos, fabricación de baterías, etc..., puede ser eliminado en un EDAR convencional en tasas que parecen oscilar entre el 50% y más del 90%. El plomo y sus compuestos, que se emplean en tuberías, pinturas y combustibles, y por lo cual es un contaminante de los que suelen integrar la denominada contaminación difusa de nuestras aguas residuales urbanas, parece que se elimina entre el 70% y el 90% vía convencional.

Con relación al mercurio, que se suele emplear en materiales eléctricos y electrónicos, baterías y amalgamas, y proceder además de restos de incineración de residuos y basuras, suelen conseguirse tasas de eliminación superiores al 70% aproximadamente. Comentando ahora el caso de níquel y sus compuestos, empleado en joyería, fabricación de monedas y utensilios de cocina, ofrece datos dispares de eliminación, que en unos estudios llega al ser del 80%, mientras en otros no supera el 20%. Finalmente, los compuestos de estaño (tributilestaño) que suelen entrar en formulaciones de compuestos de uso agrícola, preservación de maderas e insecticidas parecen poder eli-

minarse en tasas que varían entre el 70% y más del 80%.

De la revisión aportada en los párrafos anteriores puede deducirse que si bien muchos contaminantes pueden ser razonablemente bien eliminados en una EDAR convencional, otros encuentran serias dificultades. Además, la eliminación puede provocar el aumento de estos contaminantes en los biosólidos o fangos de depuración con lo cual podrían existir problemas subsiguientes para el aprovechamiento de aquéllos. Todo lo dicho hace que deba evaluarse la puesta en marcha de tratamientos químicos de depuración que complementen a las técnicas biológicas convencionales.

#### 4.2. Depuración no convencional

Los procesos químicos (que fueron los primeros empleados en tratamiento de aguas) son cada vez más empleados en depuración de aguas residuales, y junto a varios procesos físicos completan el tratamiento secundario y terciario de aguas usadas,

incluyendo también la separación de nitrógeno y fósforo. A continuación se reseñan los principales procesos fisicoquímicos de depuración de aguas empleados actualmente:

##### 4.2.1. Precipitación química

Proceso relacionado con la ya conocida coagulación química, se trata de generar compuestos metálicos poco solubles mediante adición de reactivos químicos o prácticas de efectividad similar. Así pues, la precipitación de metales pesados empleando la adición de hidróxidos y sulfuros es la más empleada normalmente. El proceso da buenos resultados en la eliminación de arsénico, bario, cadmio, cobre, mercurio, níquel, selenio y zinc, rigiéndose por las solubilidades de los correspondientes hidróxidos metálicos formados en función del pH del medio (Figura 2) al adicionar normalmente hidróxido cálcico o sódico. Dado el carácter anfótero (es decir, comportamiento como ácido o como base, dependiendo del pH) de las sustan-

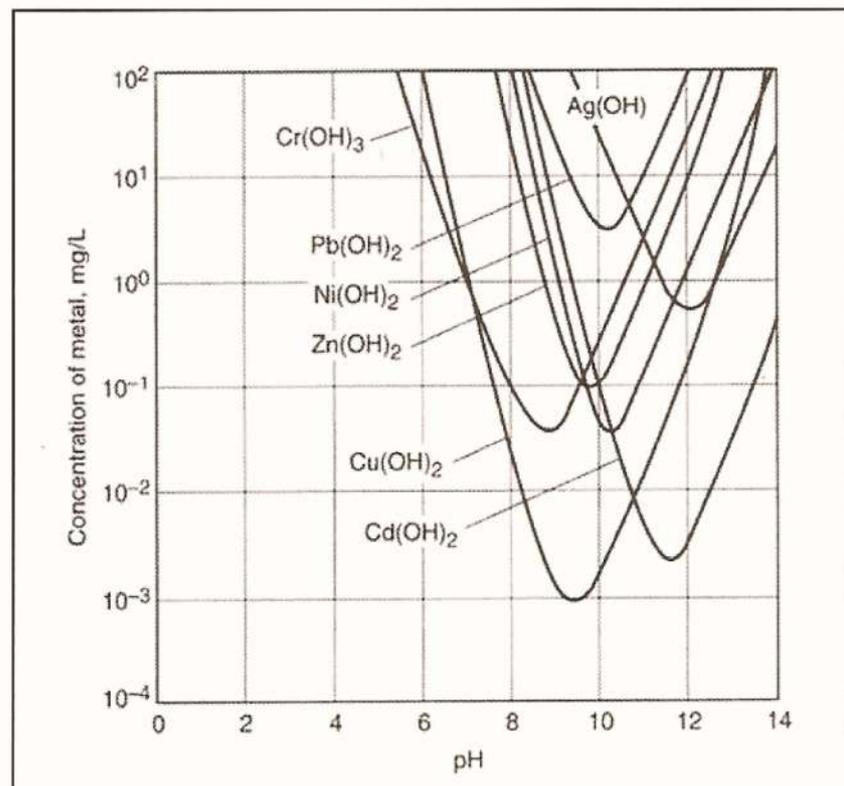
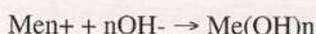


Figura 2. Diagrama de estabilidad de hidróxidos metálicos (Fuente [4]).

cias formadas, se puede comprobar cómo se da la redisolución de los hidróxidos a valores de pHs alcalinos.

En cualquier caso, el proceso general discurre según la reacción genérica:



Además, los constituyentes concretos de cada agua residual (dureza, contenido salino, sustancias orgánicas, etc.) harán que el proceso se aparte de la teoría.

También podrían eliminarse metales adicionando sulfuro sódico. En este caso, las concentraciones residuales de metal suelen ser mucho más bajas que con hidróxido, sin embargo, la toxicidad del sulfuro y sus inconvenientes técnicos a la hora de emplearlo hacen que no sea una técnica muy aplicada. De cualquier forma, las reacciones químicas genéricas serían,  $\text{Men}^+ + \text{mS}^- \rightarrow \text{MemSn}$  siendo asimismo crítico el pH del medio (Figura 3). Tanto para emplear hidróxido como sulfuro es conve-

niente la realización de ensayos a escala de laboratorio para fijar las condiciones reales de efectividad del tratamiento posterior.

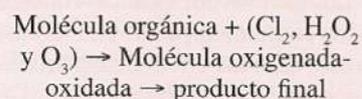
Otro proceso de precipitación química cada vez más empleado es el de la electrocoagulación. Aquí se emplean los electrones como reactivo químico. Como ventajas, no emplea más cantidad de reactivo que la estequiométrica y genera menos fangos: actúa mediante coagulación y flotación. Además, no reduce el pH del medio (como los coagulantes) y se pueden depurar aguas con pocos coloides y materias en suspensión. Es muy eficaz para orgánicos refractarios y competitivo coste económico con otros sistemas convencionales.

El sistema consta de celda electrolítica con electrodos de Al o Fe, en la que se generan iones  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{Fe}^{2+}$ - $\text{Fe}^{3+}$  que experimentan las secuencias de reacciones típicas de coagulación y precipitación química. En el contraelectrodo (Pt u otro metal inerte) se forman burbujas de hidrógeno que pueden actuar en el medio mediante electroflotación. Se

están desarrollando electrodos de carbón (amorfo, vítreo) que son efectivos en la reducción, en este caso, de compuestos orgánicos refractarios (plaguicidas, compuestos aromáticos...).

#### 4.2.2. Oxidación-reducción

La reacción global de oxidación de cualquier molécula orgánica responde a:



Como productos finales teóricos estarían  $\text{CO}_2$  y agua, así como otros intermedios que son los que en realidad se generan habitualmente, por lo que a estos procesos se los denomina como de 'oxidación simple'. Los reactivos más empleados son cloro y ozono.

Los procesos de reducción suelen ser menos empleados en depuración de aguas, siendo el más aplicado el proceso de reducción aplicada a vertidos industriales ricos en  $\text{Cr}^{6+}$ , que reducido a  $\text{Cr}^{3+}$ , más insoluble que el primero, podría después ser fácilmente eliminado mediante coagulación-floculación y subsiguiente precipitación química. En los dos casos se emplean tiosulfato sódico o sulfito sódico normalmente.

#### 4.2.3. Procesos de Oxidación Avanzada (AOP)

Este tipo de tecnologías involucran la generación y empleo de radicales libres como agentes oxidantes y se usan para lograr oxidaciones que no son llevadas a cabo por técnicas convencionales con ozono, cloro y otros. Se trata de técnicas muy novedosas que pueden ayudar a la eliminación de compuestos orgánicos refractarios a otro tipo de tratamientos más convencionales.

El empleo del radical hidroxilo OH se basa en su alto poder oxidante que lo hace reaccionar con muchos sustratos a los que oxida prác-

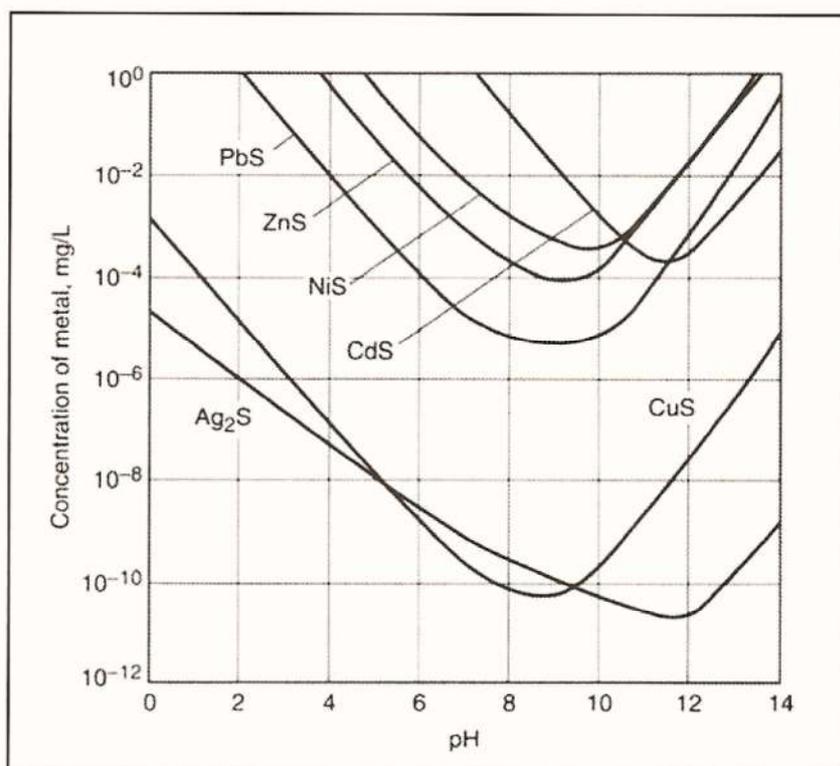


Figura 3. Diagrama de estabilidad de sulfuros metálicos [Fuente [4]].



Figura 4. Ozonizadores industriales (EMACSA, Córdoba).

ticamente hasta mineralización total. Este tipo de procesos son poco selectivos y capaces de actuar con alta eficacia sin ayuda de temperatura y/o presión, presentando además la ventaja de apenas generar subproductos problemáticos.

Existen dos tipos de tecnologías de oxidación avanzada: las que emplean ozono y las que no se basan en ozonizaciones (Figura 4):

#### 4.2.3.1. Técnicas que emplean ozono

- Ozonización a pH alcalino ( $\gg 8,00$ ).
- Ozono y radiación UV.
- Ozono y agua oxigenada ( $H_2O_2$ ).
- Ozono, agua oxigenada y radiación UV.

- Ozono y dióxido de titanio ( $TiO_2$ ).
- Ozono, dióxido de titanio y agua oxigenada.
- Ozono e irradiación con fuentes de electrones libres.
- Ozono y ultrasonidos.

#### 4.2.3.2. Técnicas que no emplean ozono

- Agua oxigenada y radiación UV.
- Agua oxigenada, y sales de Fe (II) (proceso Fenton).
- Agua oxigenada, radiación UV y sales de Fe (II) (proceso Foto-Fenton)
- Irradiación con fuentes de electrones libres.
- Cavitación electrohidráulica.
- Ultrasonidos.

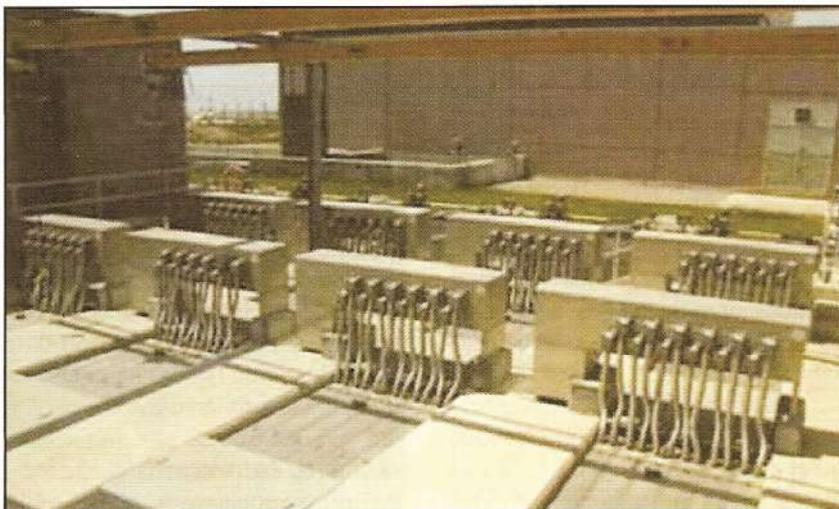


Figura 5. Tratamiento UV (Fuente InfoEnviro™).

- Descargas corona de alta energía.
- Fotocatálisis UV y dióxido de titanio.
- Irradiación gamma.
- Oxidación catalítica.
- Oxidación con agua supercrítica.

De las tecnologías comentadas, reseñemos las más empleadas en la actualidad.

#### 4.2.3.3. Ozono y UV

La irradiación UV del ozono disuelto en agua provoca una serie de reacciones en cadena, de las cuáles las más importantes son la generación de agua oxigenada que posteriormente genera radicales hidroxilo de alta reactividad. Es un proceso caro puesto que requiere la disponibilidad de un generador de ozono y su mayor efectividad se da frente a aguas residuales con sustancias susceptibles de oxidación vía UV.

#### 4.2.3.4. Ozono y peróxido de hidrógeno

Es efectiva cuando existen aguas residuales con compuestos poco afectados por la radiación UV, del tipo de tricloroetileno y percloroetileno.

#### 4.2.3.5. UV y peróxido de hidrógeno

(Figura 5) Se ha aplicado con éxito a eliminación de nitrosodimetilamina, hormonas sexuales y esteroides, medicamentos de uso clínico y doméstico, antibióticos y productos domésticos de desecho. Se observa que la técnica puede ser muy útil en tratamiento de aguas residuales urbanas.

#### 4.2.3.6. Proceso Fenton y Foto-Fenton

Se basa en el hecho de que el agua oxigenada en presencia de  $Fe^{2+}$ , que actúa como catalizador, es capaz de generar radicales OH de alta reactividad los cuáles son capaces de producir oxidaciones potentes de varios compuestos. El proceso se retroalimenta con la reducción del  $Fe^{3+}$  formado que genera más  $Fe^{2+}$  y más radicales OH. Se requiere el uso de radiación UV, bien aportada artifi-

cialmente, bien vía irradiación solar (Proceso Foto-fenton).

El proceso es capaz de oxidar fenoles, formaldehído, pesticidas, y en general, compuestos orgánicos refractarios a otro tipo de oxidaciones. Se está aplicando esta tecnología a depuración de efluentes de industrias textiles, de celulosa, y aquéllas que generan compuestos altamente resistentes a tecnologías oxidativas convencionales. También se logra la destrucción de helmintos y sus huevos.

El proceso vía irradiación solar está siendo desarrollado actualmente con buenas prestaciones, debido a su carácter ambientalmente limpio. Otros catalizadores de amplia utilización son Cu, Cr y  $TiO_2$ .

#### 4.2.3.7. Destilación

A medida que se incrementa la temperatura de una mezcla sometida a destilación, se incrementa la cantidad de sustancia en el vapor, posibilitando la separación de sustancias a través de sus diferentes puntos de ebullición [7]. Este comportamiento da lugar a los denominados "diagramas de temperatura-composición". Como ejemplo para una mezcla benceno-agua, al incrementar la temperatura de la mezcla el vapor se enriquece mucho en benceno y poco en agua a la temperatura de ebullición del benceno (Figura 6, A) de forma que al condensar éste se daría lugar

a la obtención de un líquido mucho más rico que el de partida en benceno, quedando el agua líquida exenta de la mayor parte del contaminante. Este es el fundamento práctico de los procesos de separación vía destilación (o ebullición).

En el orden práctico, y si bien la destilación no se puede aplicar a matrices que se descompongan térmicamente, su campo de uso habitual es: depuración muy exigente de efluentes; contaminantes refractarios a otro tipo de tratamientos; que exista disponibilidad de fuente de calor barata. En todo caso los principales procesos de destilación son:

- Ebullición con tubos sumergidos.
- Ebullición con evaporadores tubulares.
- Evaporación flash.
- Circulación forzada mediante compresión de vapor.
- Evaporación solar directa.
- Evaporación mediante superficies rotatorias.
- Evaporación mediante superficies adsorbentes.
- Procesos mediante recalentamiento de vapor.
- Transferencia directa a alta temperatura a otro líquido inmiscible.
- Transferencia de contaminantes a alta temperatura hacia vapores no acuosos.

De todos los procesos de destilación-evaporación disponibles, los

más empleados en depuración de aguas residuales urbanas son tres. En todos se debe reducir previamente el contenido en sólidos en suspensión del agua residual y después someterse a aireación.

- Evaporación de efecto múltiple

Se trata de esquemas de varios evaporadores en serie, en que el posterior trabaja a menor presión que el anterior. Con ello se consiguen sucesivas condensaciones de vapor de agua cada vez más limpio. El sistema se aplica a eliminación de sustancias volátiles como amonio y orgánicos de bajo peso molecular (ácidos orgánicos, aldehídos, cetonas, etc.). Es un proceso caro.

- Evaporación flash multietapa

Empleado para desalación de aguas. Aquí la generación de vapor se lleva a cabo mediante calentamiento y reducción de presión (destilación flash). Se suele trabajar con varias unidades y en cada una el calor excedente se aprovecha para el calentamiento de la siguiente. Es un proceso que requiere gran cantidad de energía, que se minimiza al incrementar el número de columnas (Figura 7).

- Destilación mediante compresión de vapor

Aquí un incremento de la presión del vapor se emplea para establecer diferencias de temperatura para la transferencia de calor. El sistema opera como sigue: después del calentamiento inicial del agua mediante un intercambiador de calor, ésta se envía al destilador que por la parte superior condensa el agua limpia, y por la inferior el concentrado de contaminantes que se descarta.

Como problemas generales en los sistemas de destilación están los de formación de incrustaciones y corrosión en equipos, aparte de su elevado coste energético. El control de pH y alcalinidad de las aguas es crítico para estas técnicas.

#### 4.2.3.8. Intercambio iónico

En los procesos de intercambio iónico el sólido intercambiador es

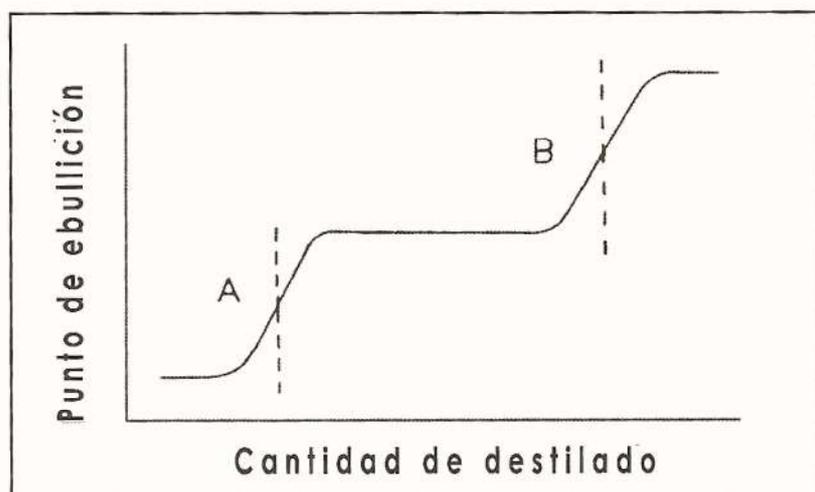


Figura 6. Fundamento de la destilación [Fuente [7]].

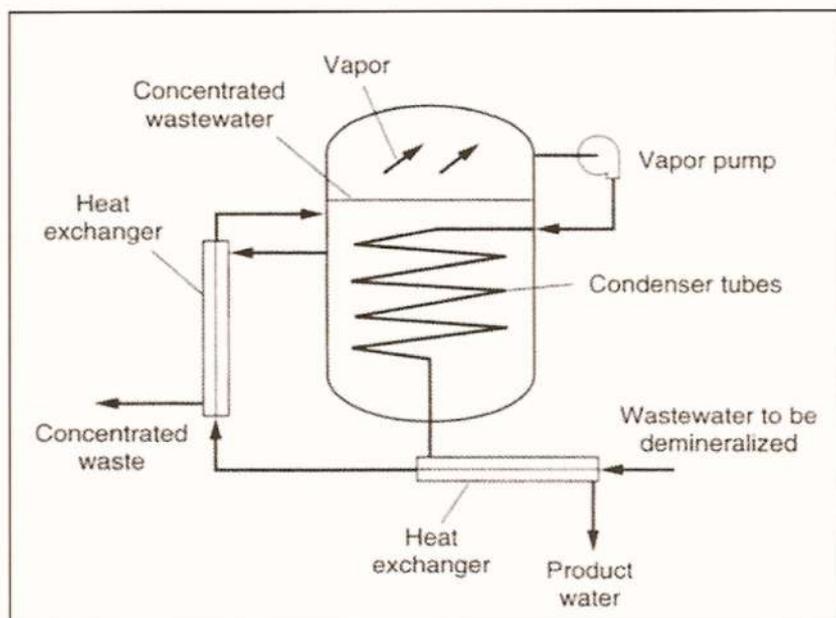


Figura 7. Evaporación flash multietapa (Fuente [4]).

una matriz porosa con cargas fijadas a ella (un cambiador iónico). Arcillas hidratadas con reemplazo isomorfo del silicio por aluminio, o del aluminio por magnesio, dan lugar a cargas negativas netas, constituyendo partículas acuáticas capaces de actuar como intercambiadores iónicos naturales. El agua incluida en la matriz constituye un medio acuoso distinto del seno de la disolución, en el que la electroneutralidad se mantiene por inclusión de un exceso de contraiones provenientes del seno de la disolución.

La reacción de intercambio en un cambiador entre sodio y calcio, por ejemplo, viene dada por la ecuación:



donde el símbolo  $\sim$  indica que el ion está ligado al cambiador. La energía que atrae a los iones en el cambiador puede ser puramente electrostática o parcialmente química. El tamaño de los poros del cambiador puede conferir también una alta especificidad, incluso en el caso de que las fuerzas sean puramente electrostáticas. En ausencia de interacciones químicas, el reparto de iones puede explicarse sobre la base de la diferencia de po-

tencial químico neta entre el cambiador y el seno de la disolución.

Se pueden establecer ecuaciones teóricas que describen el reparto de iones en disoluciones relativamente diluidas a ambos lados de una membrana semipermeable (equilibrio de Donnan) y que explican cualitativamente el papel de la carga eléctrica en el intercambio iónico, pero tienen poca utilidad para la mayoría de los cambiadores iónicos debido a que los coeficientes de actividad en la matriz del cambiador son desconocidos, como ocurre en el caso del sodio y calcio. Por estas razones se tiende a caracterizar los cambiadores iónicos empíricamente.

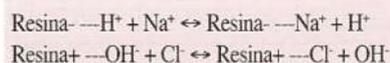
Por ejemplo, para la adsorción de iones monovalentes en una arcilla (bentonita) se ha comprobado que la selectividad se da en la secuencia  $\text{Cs}^+ > \text{Rb}^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+$ , opuesta a la de los radios hidratados de estos cationes.

En la práctica cualquier intercambiador iónico artificial es una sustancia, en general polimérica, muy poco soluble en agua, dotada de radicales ácidos o básicos en su estructura, capaces de intercambiarse con iones cargados del mismo signo que el radical existente en el agua. De este modo, el contenido iónico total tanto

del intercambiador como del agua no se modifica, pero sí su contenido cualitativo.

En cualquier caso el proceso de intercambio se detiene cuando se alcanza un equilibrio entre la concentración de especie de interés en la disolución a tratar y la concentración en la resina de intercambio. Si el proceso es suficientemente reversible, después de que la resina retira el ion del agua y se satura de éste, puede de nuevo regenerarse invirtiendo el proceso, en general mediante tratamiento con ácidos o bases débiles. Si el proceso es poco reversible, por contra, se forman compuestos poco solubles y la reacción se asemeja a las de precipitación.

Como ejemplos prácticos, supóngase una resina ácida que se utiliza para eliminar de un agua sodio, o una resina básica que se emplea para retirar cloruro. Los dos procesos químicos básicos responden a las dos ecuaciones siguientes, bien para intercambio de especies positivas (cationes) bien para el de especies negativas (aniones):



La saturación o equilibrio entre la resina y la disolución estará en función de la mayor o menor afinidad del ion por la resina. En este sentido, la mayor carga eléctrica de un ion implicará en general, una mayor capacidad de ser retenido por la resina. Si se desea una eliminación más drástica de un ion desde el agua debe forzarse el equilibrio de intercambio, mediante el empleo de varias unidades de resinas puestas en serie.

Si se representa gráficamente la concentración de ion en el efluente de la resina frente al volumen de agua tratada, se observará que a partir de un determinado punto, denominado punto de saturación, la concentración del ion se incrementa drásticamente en el agua tratada. Esto indicará la inutilidad de seguir operando con la resina sin proceder

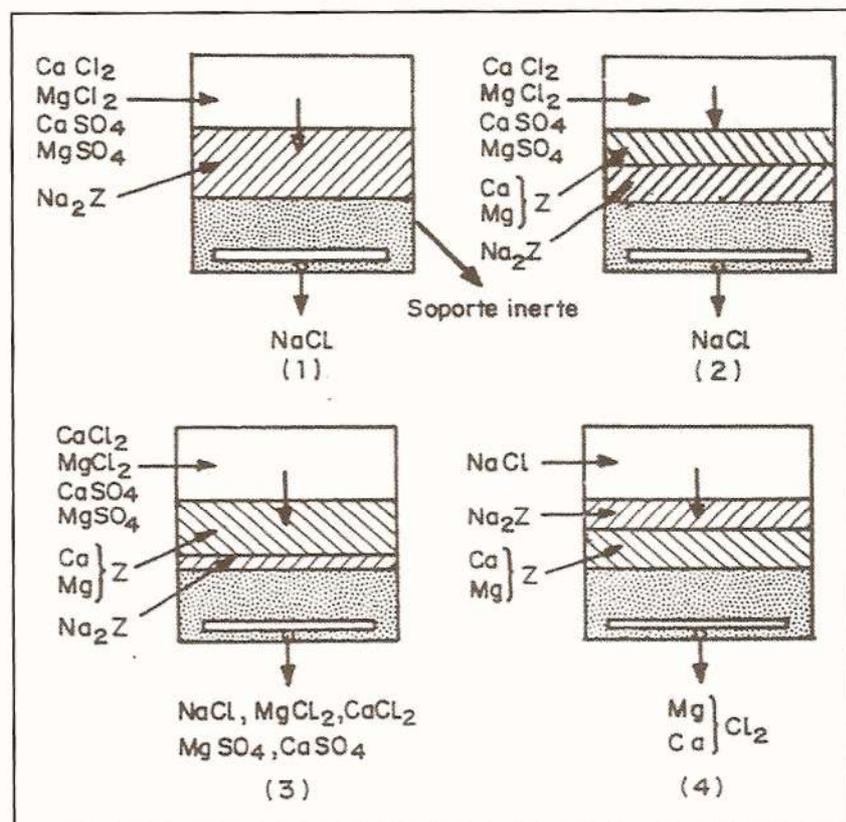


Figura 8. Intercambio iónico: comportamiento de una resina catiónica (información comercial).

previamente al lavado o regeneración de ésta (Figura 8).

El uso de intercambiadores industriales suele acometerse en equipos cerrados rellenos con la sustancia en cuestión y provistos de sistema de lavado mediante agua desmineralizada. En este sentido, indíquese que la regeneración de una resina suele ser más efectiva a contracorriente ya que supone un ahorro de reactivos y de agua de lavado.

#### 4.2.3.9. Adsorción sobre carbón activo

Se entiende por adsorción la propiedad de algunos materiales de fijar en su superficie moléculas extraídas de la fase líquida o gaseosa en contacto con ellos. Es pues, un fenómeno típico de transferencia de masa que depende pues, de la propia capacidad adsorbente de la sustancia concreta y de la concentración de la impureza a adsorber. Probablemente, el adsorbente más usado en tratamiento de aguas sea el carbón activo (granulado o en polvo).

La capacidad adsorbente de un carbón está influenciada por la naturaleza o tipo de carbón y por la propia sustancia que es adsorbida. El carbón activo es un material inerte provisto de una red carbonada, que mediante la técnica de la "activación" desarrolla una red densa de poros cuyos diámetros varían entre 10 y 2.000 Amstrong. Esta intrincada disposición hace que el carbón presente una elevada superficie de adsorción (del orden de 750 a 1.500 m<sup>2</sup>/g) similar o incluso superior a la de otros materiales adsorbentes por antonomasia, como las zeolitas o las arcillas naturales [7].

En una estructura porosa carbonácea típica coexisten tres tipos de poros: microporos, cuyo mínimo tamaño (<20 amstrong) los hace adecuados para adsorción de gases; mesoporos, entre 20-40 amstrong aptos para retención de microcontaminantes, del tipo de ácidos húmicos y fúlvicos, clorofenoles, y otras sustancias abundantes en aguas superficiales usadas para producción de agua

potable; finalmente, macroporos, mayores de 500 amstrong y con propiedades decolorantes al poder retener moléculas de alto peso molecular y también otras sustancias susceptibles de experimentar reacciones de policondensación de polisacáridos sobre ácidos aminados bajo el efecto del calor.

Para finalizar este apartado, la adsorción puede ponerse en práctica bien mediante la dosificación del adsorbente al agua, o en unión del proceso de filtración, si el adsorbente se usa como relleno mono capa o multicapa de unidades convencionales de filtración.

#### 4.2.3.10. Membranas filtrantes y ósmosis inversa

Los procedimientos de separación por membranas filtrantes, basados en las propiedades de ciertas membranas que son permeables al agua y pequeños solutos pero que retienen otras partículas, constituyen una efectiva mejora en el rendimiento de la filtración constituyendo un proceso de afino o tratamiento terciario de aguas residuales con vistas a su reutilización. Con respecto a la filtración, ésta retiene partículas del orden de varias micras de diámetro, mientras que las membranas en casos extremos (ósmosis inversa) efectúan la retención de incluso iones (Figura 9).

La microfiltración es similar a la filtración antes descrita, en el sentido de no alterar las propiedades químicas de la disolución. Retiene partículas de diámetro del orden de 10.000-1.000 micras. En estos procesos todo el caudal atraviesa el aparato de microfiltración, que tras un determinado tiempo sufre un atascamiento o colmatación.

Los procesos de ultrafiltración y de ósmosis inversa provocan la modificación del potencial químico del sistema, generando un gradiente que tiende a hacer que las especies separadas se difundan de nuevo. Para alcanzar el equilibrio se necesita suministrar una cierta presión al sistema, denominada presión osmótica,

que se relaciona con la concentración de solutos según la ecuación:

$$\pi = \Delta C \times R \times T$$

Donde  $\pi$  es presión osmótica,  $\Delta C$  es la variación de la concentración de la disolución,  $R$  es la constante de los gases perfectos y  $T$  temperatura en °K del agua. Dado que la presión osmótica es mayor a medida que el soluto es más pequeño, se comprende que las contrapresiones a aplicar en procesos de ósmosis inversa habrán de ser sustancialmente mayores que las usadas en ultrafiltración (superiores a 20 bar las primeras, e inferiores a 6 bar en el segundo caso).

En estos dos procesos, la acumulación de iones y moléculas en la proximidad de la membrana provocan más que un atascamiento propiamente dicho, otros fenómenos de polarización que incrementan la presión osmótica y dificultan el proceso filtrante.

En ultrafiltración, las moléculas disueltas quedan retenidas si su tamaño supera al de los poros de la membrana. La concentración resi-

dual de soluto en el filtrado es función directa de la concentración del soluto en el agua y de un coeficiente de polarización, cuyo mínimo valor garantizará el filtrado óptimo.

Por otro lado, en ósmosis inversa el proceso es más complicado puesto que las transferencias se producen en dos fases, una primera de disolución de moléculas dentro de la membrana, y otra de difusión de moléculas, tanto de soluto como de agua (o en general, del fluido) bajo la acción de gradientes de concentración y de presión que modifican el potencial químico de la disolución en el propio material integrante de la membrana (Figura 10). Aquí se aplican las leyes de difusión de Fick.

Para terminar este punto, deben citarse a las membranas de diálisis, cuya principal característica radica en que son impermeables al agua y permeables a especies ionizadas positiva o negativamente, o ambas. En este caso, las diferencias de potencial químico necesarias para la transferencia pueden provenir de cambios de concentración de especies (diálisis simple), cambios de presión (piezodiálisis) o cambios de potencial eléctrico (electrodiálisis).

### 4.3. Valoración final

La serie de técnicas de tratamiento reseñadas en el apartado anterior pueden permitir el tratamiento completo de cualquier agua residual, incluso sin haber sido depurada vía biológica previamente, alcanzando calidades tanto desde el punto de vista fisicoquímico como sanitario y toxicológico, que pueden asegurar su posterior reutilización en los términos legalmente aplicables.

De esta forma, se podrá poner en carga un recurso que puede ser insustituible en muchas zonas del territorio nacional, cuya disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas, o incluso aquéllas procedentes de la desalación, esté muy desfavorecida.

No obstante, y como contrapunto al párrafo anterior, el coste económico derivado de la implantación de normativas cada vez más exigentes en contaminación de aguas, así como el necesario para poner un agua en disposición de ser regenerada, supondrá un esfuerzo inversor y de explotación que repercutirá primero sobre el gestor del saneamiento, y finalmente sobre el usuario final, tal como establece la Directiva Europea sobre Aguas.

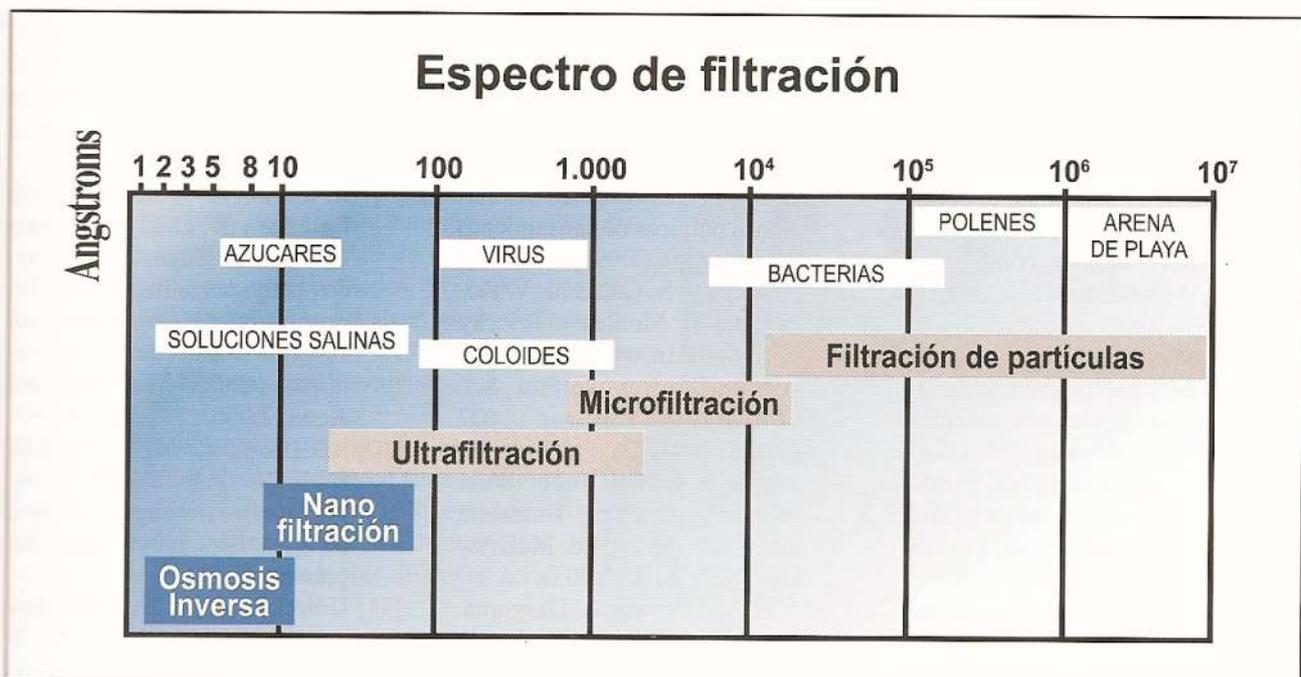


Figura 9. Separación por membranas filtrantes (InfoEnviroTM).

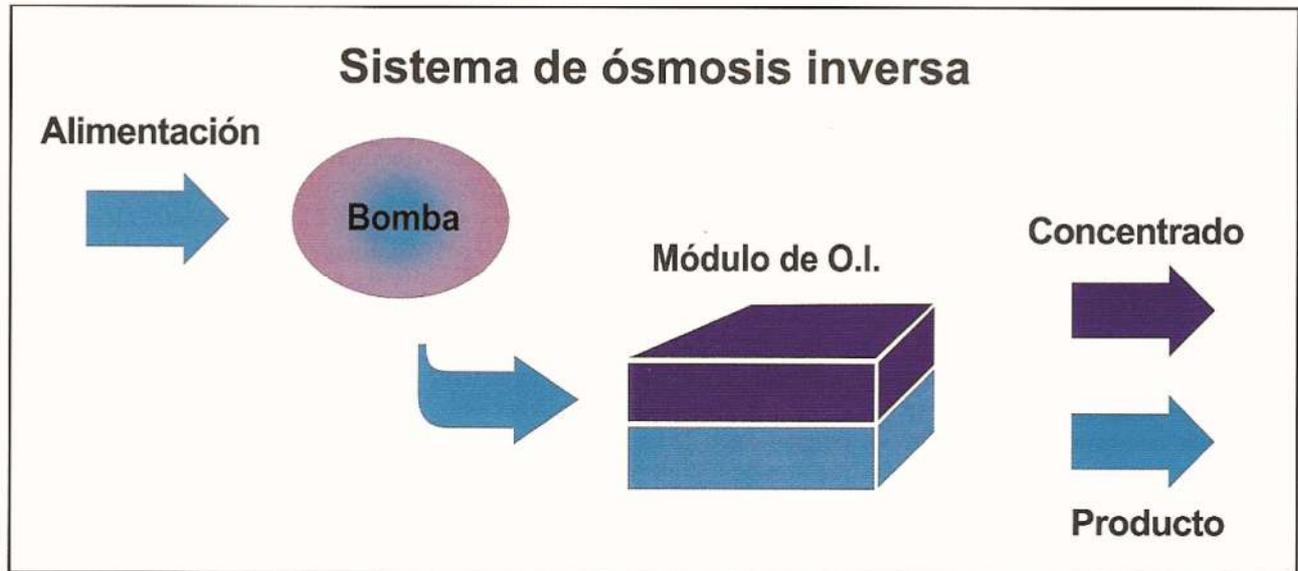


Figura 10. Ósmosis inversa (InfoEnviroTM).

## 5. Conclusiones

- Se dispone actualmente de la posibilidad de la reutilización de aguas regeneradas procedentes de la depuración de aguas residuales una vez publicada el marco legislativo. Esta práctica puede suponer una importante aportación a los caudales convencionales históricamente disponibles.
- La minimización del contenido en sustancias contaminantes en general en nuestros cauces públicos llevará asociada la consiguiente en nuestras aguas depuradas, y como fase previa, la paralela reducción o prohibición de contaminantes a nuestros saneamientos públicos.
- Las actuales técnicas de depuración intensiva de efluentes, tanto como complemento de las técnicas biológicas convencionales, como en su aspecto de tratamiento de afino o terciario de aguas residuales, aparte de su sobrecosto económico de implantación y explotación, garantizan desde la simple óptica técnica la posibilidad de cumplir las normativas sobre depuración o reutilización de aguas que en cada momento puedan estar vigentes y sean de obligado cumplimiento.
- Por lo dicho antes, será inexcusable un esfuerzo económico del sector, y a su vez del usuario final, en consonancia con lo establecido

en la Directiva Marco de Aguas de la UE.

## 6. Agradecimientos

A Ramón Queralt, director técnico de TECNOLOGÍA DEL AGUA, por sus siempre oportunas ideas sobre el tema. A la Junta de Andalucía (Grupo de Investigación FQM-0198) y a la DGICYT (Proyectos de Investigación CTQ2006-07224/PPQ y CTQ2007-60387).

## 7. Bibliografía

- [1] AEAS. Encuestas sobre Suministro de Agua Potable y Saneamiento, 2.002 y 2.004.
- [2] AEAS. Aguas Residuales Industriales. Origen, caracterización y efectos sobre las instalaciones públicas de saneamiento y depuración (1.997).
- [3] J. Gasperi, S. Garnaud, V. Rocher and R. Moilleron. Priority pollutants in wastewater and combined sewer overflow. *Sci. of the total Environ.*, 407 (2.008) 263-272.
- [4] Metcalf y Hedí Inco. *Wastewater Engineering. Treatment and reuse*, 4th ed. Ed. McGraw Hill. New York (2.003).
- [5] N.L. Nemerow y A. Dasgupta. *Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos*. Ed. Díaz de Santos. Madrid (1.998).
- [6] K. Seriki, J. Gasperi, L. Castillo, L. Scholes, E. Eriksson, M. Revitt, J. Meinhold and N. Atanasova. Priority pollutants behaviour in end of pipe wastewater treatment plants. Project n° 037036, Sixth Framework Programme, Global Change and Ecosystems, of the European Commission (2.008).
- [7] R. Marín Galvín. *Análisis de Aguas y Ensayos de Tratamiento. Principios y Aplicaciones*. Ed. GPESA, Barcelona (1.995).
- [8] R. Marín Galvín. El ciclo integral del agua en Córdoba durante el trienio (2004-2007) en cifras. *Tecnología del Agua* (2.008), 293, pág. 51-64.
- [9] R. Marín Galvín, R. Mantecón Pascual y B. Díaz de Durana Uriarte. Ordenanzas de vertidos como herramienta para lograr un más eficaz control de vertidos a las redes de saneamiento público. *Tecnología del Agua* (2.006), 277, pág. 84-93.
- [10] RD 1620/2007, de 7-12-2.007, BOE 294 de 8-12-2.007, estableciendo el régimen jurídico de la reutilización de aguas depuradas.
- [11] Unión Europea, Directiva Europea 2008/105/CE, de 16-12-2.008, D.O. L 348/84-97 (ES) de 24-12-2.008.

**En este número:**

**MesoHABSIM:** una herramienta eficaz para la gestión de ríos y cuencas fluviales  
Página 20

**Dossier aguas residuales**

**El reto de la reutilización de aguas usadas:** tratamiento intensivo de aguas residuales  
Página 28

**Efecto del pretratamiento con ultrasonidos sobre la desinfección de agua depurada**  
Página 44

**Construcción de la planta con mayor capacidad de producción mundial con tecnología EDR para agua regenerada**  
Página 56

**Aplicación de los biorreactores de membrana sumergida (BRMS) a la reutilización de agua**  
Página 63

**Valoración del efecto de origen del agua de riesgo sanitario en una experiencia piloto para promover la reutilización de agua regenerada en torres de refrigeración**  
Página 72

**A 2000 metros todo es innovador...**



... como la turbina flotante

 **MeiStream**



- Gama de medición ampliada
- Diseño revolucionario del nuevo rotor
- Primer contador Woltman con aprobación de modelo CEE en clase C
- Compatible con algunos modelos de medidores Sensus existentes
- Preparado para AMR con HRI-Mei

