

Francisco Osorio Robles
Juan Carlos Torres Rojo
Mercedes Sánchez Bas

**TRATAMIENTO DE AGUAS
PARA LA ELIMINACIÓN
DE MICROORGANISMOS
Y AGENTES CONTAMINANTES**

**Aplicación de procesos industriales
a la reutilización de aguas residuales**



Autores

AUTORES

Francisco Osorio Robles

Profesor Titular de Universidad. ETSI Caminos, Canales y Puertos.
Universidad de Granada

Juan Carlos Torres Rojo

Dr. Ingeniero Agrónomo. EMUASA

Mercedes Sánchez Bas

Licenciada en Ciencias Químicas. EMUASA

COLABORADORES

M.^a del Mar Muño Martínez

Ingeniera Química

María del Carmen Almécija Rodríguez

Dra. Ingeniera Química. Ingeniero Técnico Industrial

Juan José García Mesa

Ingeniero Químico. Ingeniero Técnico Industrial

Jose M. Rovira Delgado

Dr. Ingeniero Químico. Ingeniero Técnico Industrial

Natividad Moya Sánchez

Licenciada en Biología

Jose M. Poyatos Capilla

Dr. Ingeniero Químico. Ingeniero Técnico Industrial

Índice

Capítulo 1. Planteamiento del problema	1
1.1. Introducción	1
1.1.1. Aguas residuales, características y problemática	1
1.1.2. Legislación sobre aguas residuales y propuesta de reutilización ...	4
1.2. Tratamientos de depuración	14
1.2.1. Tratamiento biológico	14
Capítulo 2. Métodos de desinfección de aguas residuales	17
2.1. Cloración	17
2.2. Ozonización	20
2.3. Ultravioleta	22
2.4. Ácido peracético (APA)	25
2.5. Ácido peracético y radiación ultravioleta (APA/UV)	30
Capítulo 3. Membranas y su aplicación en reutilización de aguas residuales .	37
3.1. Biorreactores de membrana	42
Capítulo 4. Procesos de oxidación avanzada (POA)	47
4.1. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada	47
4.2. Procesos de oxidación avanzada homogéneos con aporte de energía mediante radiación UV	48
4.2.1. Ozono y radiación ultravioleta (O ₃ /UV)	49
4.2.2. Peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta (H ₂ O ₂ /UV)	50
4.2.3. Ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta (O ₃ /H ₂ O ₂ /UV)	52
4.2.4. Foto-Fenton (Fe ²⁺ /H ₂ O ₂ /UV)	53
4.3. Procesos homogéneos con aporte de energía mediante ultrasonidos	55
4.3.1. Ozonización y ultrasonidos	56
4.3.2. Peróxido de hidrógeno y ultrasonidos	57
4.4. Procesos homogéneos con aporte de energía mediante electricidad	58
4.4.1. Oxidación electroquímica	58
4.4.2. Oxidación anódica	59
4.4.3. Electro-Fenton	60

4.5. Procesos homogéneos sin aporte de energía	62
4.5.1. Ozonización en medio alcalino	62
4.5.2. Ozonización con peróxido de hidrógeno	62
4.5.3. Peróxido de hidrógeno y catalizador	64
4.6. Procesos heterogéneos	64
4.6.1. Ozonización catalítica	66
4.6.2. Ozonización fotocatalítica	67
4.6.3. Fotocatálisis heterogénea	69
Capítulo 5. Indicadores biológicos en aguas residuales tratadas	71
5.1. Aplicaciones de técnicas de biología molecular al estudio de la diversidad microbiana para analizar y detectar microorganismos patógenos en el agua residual tratada	74
5.1.1. Generalidades de la técnica de biología molecular en el estudio de la biodiversidad microbiana	74
5.1.2. Aplicaciones de la técnica de biología molecular a la detección de patógenos en el agua residual para su reutilización	76
Capítulo 6. Técnicas de eliminación de microorganismos en la industria agroalimentaria y farmacéutica	77
6.1. Introducción	77
6.2. Tratamientos térmicos	80
6.2.1. Pasteurización	80
6.2.2. Tratamiento UHT	87
6.2.3. Esterilización	93
6.2.4. Escaldado	96
6.2.5. Calentamiento óhmico	96
6.2.6. Calentamiento dieléctrico	99
6.3. Nuevas alternativas a tratamientos térmicos	100
6.3.1. Campos eléctricos pulsados de alta intensidad	100
6.3.2. Sistema de alta presión hidrostática (HHP)	104
6.3.3. Altas presiones dinámicas	105
6.3.4. Sistema de alta presión con CO ₂ (HPCD)	105
6.3.5. Ultrasonidos	107
6.4. Métodos de separación de microorganismos	108
6.4.1. Centrifugación	108
6.4.2. Filtración	110
6.5. Irradiación	114
6.5.1. Tipos de plantas de irradiación	115
6.6. Acidificación	117

6.7. Parámetros cinéticos para inactivación de poblaciones microbianas	118
6.7.1. Procesos térmicos	120
6.7.2. Procesos por presión	122
6.7.3. Procesos PEF (campos eléctricos pulsados)	125
6.8. Estudio bibliográfico de la tecnología aplicada a la eliminación de microorganismos en la industria	127
6.8.1. Tratamientos térmicos	127
6.8.2. Esterilización con plasma	133
6.8.3. Campos eléctricos pulsados (PEF)	139
6.8.4. Sistema de alta presión hidrostática (HHP)	146
6.8.5. Altas presiones dinámicas	153
6.8.6. Sistema de alta presión con CO ₂ (HPCD)	154
6.8.7. Irradiación	170
6.8.8. Tratamientos combinados	176
Bibliografía	187

Planteamiento del problema

El presente libro consiste en una amplia revisión bibliográfica y descripción de posibles sistemas de inertización biológica para la reutilización de aguas residuales que se están utilizando en los actuales sistemas de desinfección en los tratamientos de aguas. Se analizarán profundamente las técnicas y sistemas utilizados en la industria alimentaria y farmacéutica para inertizar los productos, y se analizará la posible aplicación de estas técnicas al tratamiento de aguas para su reutilización.

Por lo tanto, y a modo de resumen, se analizarán los siguientes puntos:

- Legislación de aguas residuales y propuesta de normativa de reutilización.
- Limitaciones de los actuales sistemas de desinfección utilizados en los tratamientos de aguas.
- Procesos de oxidación avanzada.
- Indicadores biológicos (real decreto de reutilización).
- Técnicas y sistemas utilizados en las industrias alimentarias y farmacéuticas.

1.1. Introducción

Esta introducción inicial nos da una idea de la problemática existente en las aguas residuales urbanas, analizando su posible composición. Si se desea reutilizar el agua residual, y en función de esta composición y de su naturaleza de biodegradabilidad, podrá requerirse la aplicación de algunas de las técnicas que serán descritas en el libro.

Posteriormente a este primer punto se analizarán los criterios legislativos existentes en depuración de aguas residuales, así como la reciente normativa de reutilización donde se define la calidad necesaria del agua según la aplicación posterior de ésta.

1.1.1. Aguas residuales, características y problemática

Se puede definir como agua residual aquella que procede del empleo de un agua natural o de la red en un uso determinado. La eliminación del agua residual se conoce como vertido.

El desarrollo de la teoría del germen a cargo de Koch y Pasteur en la segunda mitad del siglo XIX marcó el inicio de una nueva era en el campo del saneamiento. Antes de

estos estudios no se había profundizado demasiado en la relación existente entre contaminación y contaminantes (Metcalf y Eddy, 1995). Snow en 1849 demostró la transmisión del cólera a través de aguas contaminadas por aguas residuales; a partir de este momento se tomó conciencia de que las aguas residuales eran transmisoras de enfermedades y por lo tanto un problema que resolver (Gómez y Hontoria, 2003).

Las aguas residuales, además de patógenos, contienen otras muchas sustancias contaminantes; definir de una forma exacta lo que es un agua residual es complejo, ya que está en función de las características que se den en cada población o industria, y también depende del sistema de recogida que se emplee, pudiendo ser:

- Aguas residuales domésticas, procedentes de zonas residenciales o similares.
- Infiltraciones y aportaciones incontroladas, son aguas que entran de forma directa o indirecta en la red de alcantarillado y no se conoce demasiado su composición.
- Aguas pluviales, que son aguas resultantes de las escorrentías superficiales, con contaminantes en metales pesados.
- Aguas de complejos industriales u hospitalarios.

Las zonas residenciales y los centros comerciales constituyen las principales fuentes de generación de aguas residuales urbanas, por lo tanto, la cantidad de agua residual depende directamente de la cantidad de población, por ello es muy típico hacer una determinación del caudal del agua residual en función de la población equivalente. El caudal de agua residual es variable a lo largo del día, y también a lo largo del año (Metcalf y Eddy, 1995).

La composición de las aguas residuales también puede ser muy variable, pues depende de muchos factores; en la Tabla 1.1 se pueden apreciar unos valores típicos de parámetros físico-químicos de aguas residuales urbanas en función del grado de contaminación.

Entre los distintos elementos contaminantes que contiene el agua residual urbana, cabría destacar la materia orgánica, procedente principalmente de las aguas domésticas; estos compuestos son de naturaleza reductora, por lo que consumirán oxígeno, y pueden estar presentes de forma coloidal o disuelta. Además existe la presencia de elementos de naturaleza inorgánica, que pueden ser de muy distinta composición, desde nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, hasta sustancias tóxicas y peligrosas (Gómez y Hontoria, 2003).

La materia orgánica de las aguas residuales puede subdividirse en varias categorías (Figura 1.1), basándose la primera división de importancia en la biodegradabilidad. La materia orgánica no biodegradable es biológicamente inerte y pasa a través de un sistema de tratamiento biológico sin modificarse, pudiéndose diferenciar en dos grupos dependiendo de su estado físico: soluble y particulada. La materia inerte soluble (SI) abandonará el sistema de tratamiento biológico con el mismo nivel de concentración con el que entró. La materia inerte suspendida (XI), normalmente quedará atrapada en los fangos del proceso biológico.

La materia orgánica biodegradable puede dividirse a su vez en dos grupos también: rápidamente biodegradable y lentamente biodegradable; tanto la rápidamente biodegradable como la lentamente biodegradable pueden presentarse en estado soluble o particulado.

A efectos prácticos se considera toda la materia rápidamente biodegradable como si fuera soluble (Ss), y toda la materia lentamente biodegradable como si fuera particulada (Xs).

Planteamiento del problema

Tabla 1.1. Grado de contaminación de las aguas residuales urbanas (Gómez y Hontoria, 2003).

Parámetros	Grados de contaminación		
	Fuente	Media	Débil
Sólidos totales	1.000	500	200
Sólidos totales fijos	300	150	80
Sólidos totales volátiles	700	350	120
Sólidos en suspensión	500	300	100
Sólidos en suspensión fijos	100	50	30
Sólidos en suspensión volátiles	400	250	70
Sólidos disueltos	500	200	100
Sólidos disueltos fijos	200	100	50
Sólidos disueltos volátiles	300	100	50
Sólidos sedimentables	250	180	40
Sólidos sedimentables fijos	150	108	24
Sólidos sedimentables volátiles	100	72	16
DBO ₅	400	220	110
DQO	1.000	500	250
COT	290	160	80
N _{total}	86	50	25
N _{orgánico}	35	20	10
NH ₄ ⁺	50	30	15
NO ₃ ⁺	0,4	0,2	0,1
NO ₂ ⁻	0,1	0,05	0,0
P _{total}	15	8	4
P _{orgánico}	5	3	1
P _{inorgánico}	10	5	3
pH	6-9	6-9	6-9
Grasas	150	100	50

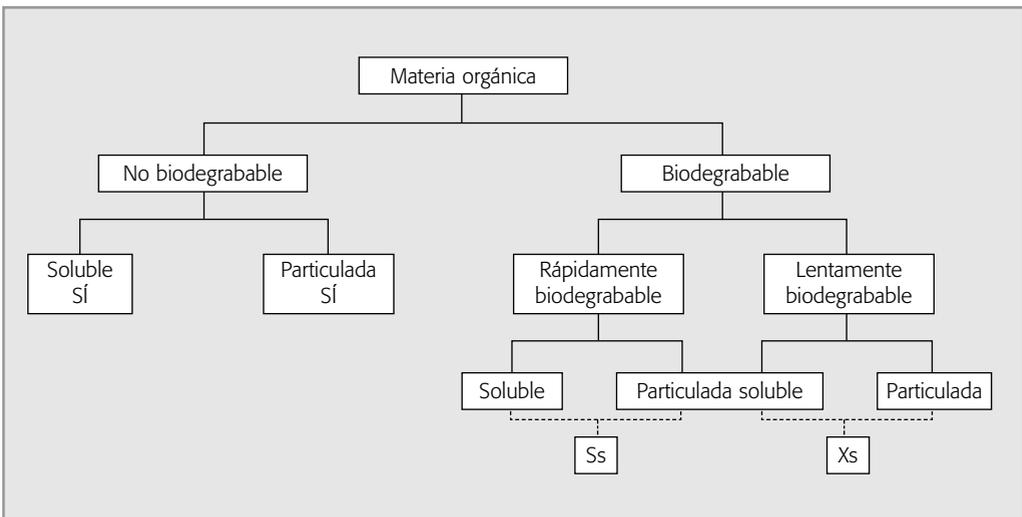


Figura 1.1. Subdivisión de la materia orgánica en las aguas residuales (modificado de Henze *et al.*, 1987).

Por lo tanto, teniendo en cuenta todo lo anterior, el agua residual, debido a su composición, puede originar problemas medioambientales muy severos, la presencia de materia orgánica junto con nutrientes puede provocar alteraciones en la microbiota de un sistema, llegándose a producir eutrofización del medio, con presencia de sustancias tóxicas que pueden causar daños muy graves, incluso a los seres humanos, si se utiliza esta agua.

Teniendo en cuenta lo anterior los tratamientos que se le realizarán al agua estarán en función de la degradabilidad o no del agua residual, y de los criterios de su posible reutilización.

1.1.2. Legislación sobre aguas residuales y propuesta de reutilización

Actualmente para controlar los problemas medioambientales que pueden originar las aguas residuales, descritos en los apartados anteriores, existe una amplia legislación al respecto. A continuación se presenta una lista de la diversa legislación relacionada con aguas residuales.

- RD Legislativo 1/2001, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas que deroga la Ley 29/1985 y la Ley 46/1999. Modificado por la Ley 62/2003.
- RD 849/86, de Reglamento del Dominio Público Hidráulico. Este Real Decreto parcialmente modificado por los Reales Decretos 1315/1992, 419/1993, 1771/1994, 995/2000 y 606/2003 (afectado por la Orden MAM/1873/2004).
- RD 927/88, de Reglamento de la Administración Pública del Agua y la Planificación Hidrológica.
- Ordenanza municipal de vertidos a la red de alcantarillado. Por ejemplo, en el caso concreto de Granada: BOP 30/05/00.
- Vertido en zonas costeras:
 - Ley de Costas 22/1988. El fin de esta ley es garantizar la protección de la calidad de las aguas y evitar el vertido de sustancias peligrosas al mar.
 - RD 258/1989, Orden 31/10/1989 y 28/10/1992. Incorporan las Directivas 76/464/CEE y 86/280/CEE, relativas a contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas al mar y valores límites de emisión de dichas sustancias.
 - Legislación autonómica. En el caso concreto de la Comunidad Autónoma de Andalucía hay que considerar el Decreto 334/ 1994 que regula el procedimiento para la tramitación de autorizaciones de vertido al dominio público marítimo-terrestre y el Decreto 14/96, Reglamento de Calidad de las Aguas Litorales, para profundizar y ampliar lo establecido en la legislación vigente en materia de vertidos desde tierra al mar.

En relación con el tratamiento de las aguas residuales urbanas, surgen las Directivas 91/271/CEE y 98/15/CE, que modifican Anexo I de la anterior, y sus transposiciones al ordenamiento jurídico español mediante el RD Ley 11/95; RD 509/96, que desarrolla el RD anterior; RD 2116/98, se modifica el cuadro 2 del Anexo I del RD 509/96 y BOE 30/11/98, corrección de erratas del RD 2116/98,

Como consecuencia de la transposición de las Directivas anteriores se redacta el Plan Nacional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales 1995-2005 (BOE 12/05/95)

y se declaran las «zonas sensibles» en las cuencas hidrográficas intercomunitarias, mediante BOE 30/06/98; en Andalucía, el Decreto 54/1999 declara las zonas sensibles, normales y menos sensibles en las aguas del litoral y de las cuencas hidrográficas intra-comunitarias de la Comunidad Autónoma de Andalucía (BOJA 23/03/99). Más recientemente se han actualizado las zonas sensibles mediante la Resolución de 10 de julio de 2006, de la Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad, por la que se declaran las Zonas Sensibles en las Cuencas Hidrográficas Intercomunitarias.

Con respecto a las aguas residuales industriales hay que diferenciar:

- Aguas procedentes de actividades domésticas o residuos de actividad humana, si se recogen por separado de las procedentes de fábrica: se tratan como *aguas domésticas normales*.
- Dentro de las *aguas procedentes de industria* se distingue entre:
 - Aguas residuales industriales asimilables a urbanas: se pueden verter a la red de saneamiento. La normativa de ámbito local debe establecer las características que debe cumplir el agua industrial para poder ser caracterizada como asimilable a urbana y poder así ser vertida a la red de saneamiento; en caso contrario, se prohíbe el vertido.
 - Aguas residuales industriales no asimilables a urbanas: no se pueden verter a la red de saneamiento. Sobre estas aguas habrá que realizar un tratamiento adecuado para hacerlas asimilables a urbanas y poder verterlos a la red de saneamiento o bien tratarlas de forma independiente hasta cumplir las condiciones de su vertido, indicadas en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico o en la legislación que regula el vertido al mar, en su caso.

Según la normativa vigente que regula el Dominio Público Hidráulico, los vertidos a éste estarán gravados con una tasa destinada al estudio, control, protección y mejora del medio receptor de cada cuenca hidrográfica. Este canon será independiente de los cánones o tasas que puedan establecer las comunidades autónomas o las corporaciones locales para financiar obras de saneamiento y depuración. Todos los conceptos en relación a este tema han sido actualizados mediante la Orden MAM/85/2008, de 16 de enero, por la que se establecen los criterios técnicos para valoración de los daños al dominio público hidráulico y las normas sobre toma de muestras y análisis de vertidos de aguas residuales.

Desarrollando lo anterior, la Ley de Aguas y la Ley de Costas establecen diferentes medidas para conseguir una mejor calidad de las aguas continentales y marítimas respectivamente, entre las que cabe destacar el sometimiento a autorización previa de las actividades susceptibles de provocar la contaminación del dominio público hidráulico o del dominio público marítimo-terrestre y, en especial, los vertidos.

Ahora bien, una adecuada protección de la calidad de las aguas exigiría completar las medidas establecidas en las leyes citadas, con otras que sometan los vertidos de las aguas residuales urbanas, previamente a su evacuación, a una serie de tratamientos en instalaciones adecuadas, para limitar los efectos contaminantes de dichas aguas residuales, con el fin último de garantizar la protección del medio ambiente.

Con este objetivo, la Unión Europea aprobó la Directiva 91/271/CEE, del Consejo, de 21 de mayo, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas, en la cual se establece que los estados miembros adoptarán las medidas necesarias para garantizar que