

CAPÍTULO 11

CONTAMINACIÓN DEL AGUA: ORIGEN, CONTROL Y MONITOREO

IGNASI RODRÍGUEZ-RODA
JOAQUIM COMAS Y MANEL POCH

11.0 Introducción

El término “agua residual” hace referencia a toda combinación de líquidos o aguas que transportan residuos procedentes de residencias, instalaciones públicas y centros comerciales e industriales y a las que, eventualmente, se pueden incorporar aguas subterráneas, superficiales y pluviales.

La intensa explotación de recursos que supone la creciente industrialización del mundo, ha agravado notablemente un problema ya de por sí complejo, como es el del tratamiento de las aguas residuales. Con el paso de los años, no solo ha aumentado la cantidad de agua residual generada, sino también la concentración de contaminantes que esta transporta, así como la cantidad de nuevos compuestos de síntesis (se estima que aparecen hasta 10 000 nuevos productos cada año) que se producen.

En los complejos ecosistemas naturales, las interacciones existentes entre todos sus componentes permiten al sistema asimilar las pequeñas perturbaciones tendentes a modificar su equilibrio natural. Dentro del ecosistema global, el ciclo hidrológico garantiza la circulación y disponibilidad de agua (aparte las reservas naturales, cada año llegan a la tierra en forma de precipitación -lluvia y/o nieves- unos 113 billones de metros cúbicos). El hombre, que antiguamente tan sólo era una pequeña etapa de este ciclo, se ha convertido en su factor determinante, y la madre naturaleza se ha visto superada en su lucha por mantener unas mínimas condiciones que permitan el desarrollo de la vida.

El impresionante volumen de agua residual que producen las aglomeraciones de población de millones de habitantes, como México DF., Sao Paulo o New York, o las elevadas concentraciones de combinaciones complejas de compuestos que caracterizan las corrientes de subproductos de determinados procesos químicos que sustentan la industria moderna, muestran que el hombre no tiene límites a la hora de superar la capacidad autodepurativa que presenta (¿presentaba?) el ecosistema, cada vez más debilitado y susceptible. Queda claro, pues, que el hombre y su actividad resultan ser los principales responsables de la contaminación de los recursos hidráulicos. Pero el hombre es también el

único que puede actuar sobre estos focos contaminantes con objeto de reducir su impacto hasta unos límites asimilables por el entorno y de facilitar, de este modo, el restablecimiento del equilibrio natural.

Pese a que, en esta asignatura, nos centraremos en el origen y monitoreo de las aguas residuales así como en sus sistemas de tratamiento (intensivos y naturales), cabe recordar que existe un consenso para considerar la depuración como el paso final de un proceso más global y sostenible, que hace énfasis en una política de actuación sobre los hábitos y comportamientos, con el fin de controlar y evitar el consumo elevado e irracional de los recursos, minimizando la generación de residuos generados en origen.

11.1 Composición del agua residual urbana

Los parámetros que permiten cuantificar y normalizar el nivel de contaminación de las aguas residuales pueden clasificarse, en primera instancia, en físicos (temperatura, agua, color y turbidez) y químicos (principalmente sólidos, materia orgánica, nutrientes, pH, alcalinidad, dureza, cloruros y grasas). La tabla 11.1 muestra los rangos típicos de concentración de los contaminantes químicos en un agua residual urbana estadounidense.

11.1.1 Parámetros físicos

- **Temperatura.** Varía en función de la estación del año, pero suele ser ligeramente más alta que la del agua corriente. Tiene efecto sobre la actividad microbiana, la solubilidad de los gases y la viscosidad.
- **Color.** El agua residual presenta un color gris claro, pero se oscurece con el paso de los días o en condiciones de septicidad. Cualquier otro color que presente el agua es debido a la presencia de determinados compuestos como los tintes, la sangre, el cromo, los derivados lácticos, etc.
- **Olor.** El agua residual fresca se caracteriza por un olor ligeramente desagradable que denota la presencia de aceites y detergentes. Cuando envejece, aparecen olores de podredumbre resultantes de la descomposición de la materia orgánica y otros productos más complejos.
- **Turbidez.** Ausencia de transparencia debida a la presencia de una amplia variedad de sólidos en suspensión en el agua residual.

Componente	Rango medio	Valor típico
Sólidos totales	375 - 1800	740
Sedimentables (mg l ⁻¹)	5 - 20	10
En suspensión (mg l ⁻¹)	120 - 360	230
Fijos	30 - 80	55
Volátiles	90 - 280	175
Disueltos (mg l ⁻¹)	250 - 800	500
Fijos	145 - 500	300
Volátiles	105 - 300	200
Materia orgánica (mg O ₂ l ⁻¹)		
DBO ₅	110 - 400	210
DQO	200 - 780	400
COT	80 - 290	150
Nitrógeno total (mg N l ⁻¹)	20 - 85	40
Nitrógeno orgánico	8 - 35	20
Amonio	12 - 50	20
Nitritos y nitratos	0	0
Fósforo total (mg P l ⁻¹)	4 - 15	8
Orgánico	1 - 5	3
Inorgánico	3 - 10	5
pH	6.7 - 7.5	7
Alcalinidad (mg CaCO ₃ l ⁻¹)	50 - 200	100
Dureza (mg CaCO ₃ l ⁻¹)	180 - 350	240
Cloruros (mg l ⁻¹)	30 - 100	50
Grasas (mg l ⁻¹)	50 - 150	100

Tabla 11.1.- Rangos de concentración de los principales contaminantes del agua residual urbana. Fuente: Metcalf and Eddy, 2003.

11.1.2 Parámetros químicos

— Sólidos totales (ST)

- **Sedimentables.** Fracción de sólidos, orgánicos e inorgánicos que sedimenta en una hora en un cono de Imhoff. Representa aproximadamente el lodo que se puede eliminar en el tanque de sedimentación (mg l⁻¹).
- **En suspensión (SST).** Fracción de sólidos, orgánicos e inorgánicos, que no están disueltos. Solamente se pueden eliminar por coagulación o filtración (mg l⁻¹).
- **Fijos.** Compuestos minerales o fracción no combustible de los SST (mg l⁻¹).
- **Volátiles.** Compuestos orgánicos o fracción combustible de los SST (mg l⁻¹).

- **Disueltos.** Fracción de sólidos, orgánicos e inorgánicos, que no es filtrable. Incluye todos aquellos sólidos inferiores a 1 milimicra ($m\mu$).
 - **Fijos.** Compuestos minerales o fracción no combustible de los sólidos disueltos totales ($mg\ l^{-1}$).
 - **Volátiles.** Compuestos orgánicos o fracción combustible de los sólidos disueltos totales ($mg\ l^{-1}$).
- **Materia orgánica**
- **DBO₅.** Representa la fracción orgánica biodegradable presente en el agua residual y es una medida del oxígeno disuelto que requieren los microorganismos para consumir esta materia orgánica, en 5 días y a 20°C de temperatura ($mg\ O_2\ l^{-1}$).
 - **DQO.** Medida de la fracción de materia orgánica que es degradable por la acción de agentes químicos oxidantes (dicromato de potasio) en medio ácido. También se mide por la cantidad estequiométrica de oxígeno disuelto requerido para llevar a cabo la reacción ($mg\ O_2\ l^{-1}$).
 - **COT.** Carbón orgánico total contenido en la materia orgánica. Se determina mediante la conversión a CO_2 del carbono presente en la muestra, a altas temperaturas y en presencia de un catalizador ($mg\ l^{-1}$).
- **Nitrógeno total**
- **Nitrógeno orgánico.** Incluye el nitrógeno ligado a las proteínas, a los aminoácidos y a la urea ($mg\ l^{-1}$).
 - **Amonio.** Primer producto de la descomposición del nitrógeno orgánico ($mg\ l^{-1}$).
 - **Nitrógeno Kjeldahl.** Parámetro resultante de la suma de los dos anteriores, el amonio y el nitrógeno orgánico ($mg\ l^{-1}$).
 - **Nitritos y nitratos.** Formas más oxidadas del nitrógeno ($mg\ l^{-1}$).
- **Fósforo total**
- **Orgánico.** Fracción del fósforo que se encuentra ligado a la materia orgánica ($mg\ l^{-1}$).
 - **Inorgánico.** Fracción inorgánica del fósforo que existe como ortofosfatos y polifosfatos ($mg\ l^{-1}$).
- **pH.** Indicativo de la naturaleza básica o ácida del agua residual.
- **Alcalinidad.** Se debe a la presencia de iones bicarbonato, carbonato e hidróxido en el agua residual y ofrece resistencia a los cambios de pH ($mg\ CaCO_3\ l^{-1}$).

- **Dureza.** Principalmente debida a los iones calcio y magnesio disueltos en el agua ($\text{mg CaCO}_3 \text{ l}^{-1}$).
- **Cloruros.** Proporcionan mayor conductividad al agua y aumentan su densidad (mg l^{-1}).
- **Grasas.** Fracción de materia orgánica soluble en hexano. Incluye grasas y aceites de origen animal y vegetal (mg l^{-1}).

Para realizar estimaciones de la cantidad y calidad del agua residual generada por una población, se establecen una serie de valores medios de referencia por persona y día. Estos valores, recogidos en la tabla 11.2, se calculan a partir de las concentraciones medias de contaminación, con una generación aproximada de entre 250 y 450 litros por persona (en función del desarrollo económico de la zona).

Componente	Carga unitaria ($\text{g persona}^{-1} \text{ día}^{-1}$)
DBO ₅	95
DQO	180
SST	104
N orgánico	9
N amoniacal	9
Fósforo total	4

Tabla 11.2.- Estimación de la carga contaminante diaria por habitante. Fuente: Metcalf and Eddy, 2003.

11.2 La problemática de las aguas residuales

La composición característica del agua residual es tal que su estancamiento puede conllevar una serie de consecuencias que dificultan o imposibilitan la vida por diferentes vías:

- **La elevada presencia de microorganismos patógenos** (principalmente procedentes del aparato digestivo humano y animal) favorece la transmisión de enfermedades como la gastroenteritis, el cólera, la disentería, el tifus o la hepatitis A. Este hecho es todavía habitual en zonas subdesarrolladas, donde las precarias condiciones de vida y la inexistente canalización de las aguas residuales provoca constantes y peligrosas epidemias entre los niños (decenas de miles de personas mueren diariamente en el mundo a causa del consumo y uso de agua en mal estado).
- **El elevado contenido en materia orgánica** del agua residual (disuelta o particulada) facilita la actividad microbiana, bien por vía anaeróbica,

- con la consecuente aparición de olores desagradables, bien por vía aeróbica, hecho que implica una disminución del nivel de oxígeno disuelto en el agua y dificulta la vida acuática.
- **Los sólidos en suspensión** de origen inorgánico no son tan problemáticos como los orgánicos pero, en grandes cantidades, pueden provocar acumulaciones que dificulten o modifiquen el curso natural de las aguas superficiales, con las consecuencias que de ello se puedan derivar.
 - **Los nutrientes** presentes en el agua residual facilitan el crecimiento de plantas acuáticas. Cuando este crecimiento es excesivo y descontrolado, provoca la eutrofización del medio receptor, con la consecuente mortalidad de peces y plantas.
 - **Las trazas de metales o compuestos tóxicos** también pueden llegar a resultar letales si se produce un aumento significativo de su concentración por acumulación.

11.3 Tratamiento intensivo de las aguas residuales mediante las estaciones de tratamiento de aguas residuales (EDAR)

Para tratar de una manera intensiva las aguas residuales, se precisan diversas operaciones y procesos unitarios. El diagrama de flujo de una EDAR está integrado por distintas combinaciones de procesos físicos, químicos y biológicos. El proceso global sigue siempre una secuencia lógica:

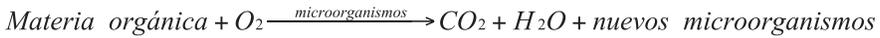
- **Una primera etapa de pretratamiento**, en la que se realiza un primer desbaste de los sólidos más grandes que arrastra el agua residual que llega por el colector. La finalidad del pretratamiento es evitar posibles obturaciones posteriores, además de eliminar el efecto abrasivo de estos materiales sobre mecanismos y componentes mecánicos, como las bombas y válvulas que se encuentran a lo largo del proceso. Esta operación física se suele realizar mediante una secuenciación de rejillas, con distinto paso de luz y automatismo de limpieza, pero también existe la posibilidad de incluir un triturador que reduzca significativamente el tamaño de las partículas. La adición posterior de un desarenador permite separar las arenas más finas (por gravedad) y los aceites y grasas presentes (por flotación).
- **Una segunda etapa**, en la que el agua se deja reposar unas horas en un **tanque de decantación primaria** con objeto de que sedimente la materia orgánica sedimentable, así como el resto de arenas o partículas inorgánicas que no han quedado retenidas en el pretratamiento. Los sólidos sedimentados (llamados **lodos primarios**) son enviados hacia una línea de tratamiento específico (**línea de lodos**), siendo habitual

su paso previo por un tamiz que separa parte del material básicamente inorgánico presente (como los pelos o las colillas de cigarrillos). Cuando la carga es demasiado elevada, o el tiempo de retención insuficiente, se puede completar la decantación natural de la materia en suspensión por adición de coagulantes y floculantes químicos. Este tratamiento químico es obligado cuando el agua contiene metales o algún tóxico que pueda interferir en la actividad de los microorganismos en la posterior etapa biológica.

- Seguidamente, el agua, libre ya de la mayoría de contaminantes particulados, pasa a la **etapa de tratamiento secundario**, la más importante del proceso. El fundamento de esta etapa es acelerar un proceso biológico que se produce de modo natural en el ecosistema, es decir, la degradación por parte de una población multiespecífica de microorganismos de la materia orgánica y de los nutrientes disueltos en el agua. Esta reacción se lleva a cabo en los **biorreactores**, en los que el agua se mezcla debidamente. Cuando el proceso de depuración es anaeróbico, se aporta oxígeno al agua. Más adelante en este capítulo, se detallan las configuraciones más habituales, los mecanismos y la operación que posibilita este binomio depurativo bacteria-sustrato.
- Siguiendo el camino que recorre el agua a lo largo de la EDAR, la última de las etapas consiste en una nueva separación que suele llevarse a cabo en los **decantadores secundarios**, aunque también es habitual encontrar sistemas de separación por flotación o microfiltración por membranas. El objetivo es lograr una correcta separación entre el agua residual tratada y la biomasa presente. El sobrenadante suele ser vertido directamente hacia el medio receptor, donde sigue su ciclo natural aunque, en caso de mayor requerimiento de calidad (riego, reutilización, recarga de acuíferos, etc.), puede recibir un tratamiento más avanzado como la cloración, el filtrado mediante lechos de arena, la adsorción en carbón activo, o la ósmosis inversa.
- Paralelamente, las dos fases de decantación generan una elevada cantidad de sólidos, conocidos como **fango** o **lodos primarios** y **lodos secundarios**, que precisan de un tratamiento específico para reducir su volumen y peso y mejorar sus características. Esta nueva secuencia de procesos se engloba en una nueva línea de tratamiento, la **línea de lodos**, que suele constar de un espesamiento inicial por gravedad, una digestión y estabilización (normalmente anaeróbica y con la adición de agentes químicos) y una deshidratación final (en general mecánica, aunque existe la posibilidad de tratamientos térmicos e incineración).

El **sistema de lodos activos** es el proceso más común de tratamiento biológico intensivo de las aguas residuales. Consiste en una oxidación bacteriana del residuo orgánico, seguida de una separación entre los sólidos en suspensión y el agua

tratada. Simplificando el proceso, se puede considerar que los microorganismos utilizan el oxígeno disuelto en el agua para consumir el sustrato (su alimento, que en este caso son las moléculas orgánicas biodegradables contenidas como contaminantes en el agua residual). La energía obtenida de este modo por los microorganismos, les permite mantener sus funciones vitales, a la vez que conlleva una elevada producción de nuevos individuos. En cierto modo, se consigue transformar la fracción soluble de materia orgánica en materia particulada, hecho que facilita su posterior separación mediante una simple decantación:



La mayor parte de los microorganismos separados en el decantador es recirculada al reactor biológico para mantener, de este modo, la concentración necesaria de biomasa, mientras que una pequeña fracción es purgada diariamente del sistema y enviada hacia la línea de lodos, con el fin de evitar una acumulación y envejecimiento excesivo de la biomasa presente en el sistema. La figura 11.1 muestra el esquema básico del sistema de lodos activos, con un reactor biológico aireado con la biomasa en suspensión que recibe el influente, seguido de un decantador que separa la biomasa y con un sistema de retorno conformado por la recirculación y la purga.

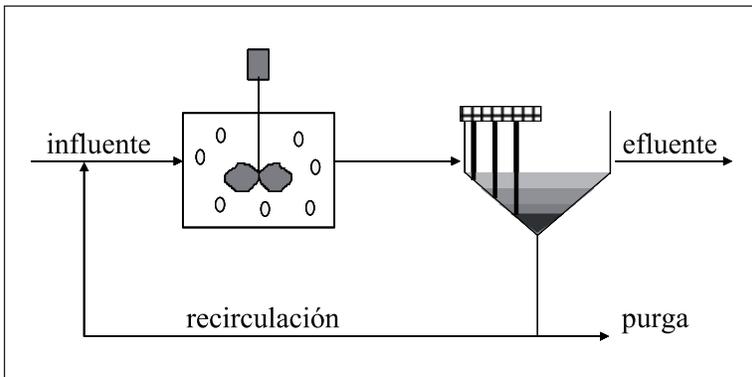


Figura 11.1.- Sistema de lodos activos. Elaboración propia.

En el campo de las aguas residuales, existen diversos vocablos que se utilizan para referirse a los microorganismos responsables de la depuración. Así, podemos referirnos a ellos como **biomasa**, **sólidos**, **licor mezcla** (que hace referencia al líquido de color marrón que resulta de la mezcla entre el agua y los microorganismos presentes en el biorreactor), **lodos**, **fangos** y “bichos” en determinados casos poco formales. Todos ellos hacen referencia a la población multiespecífica que conforma la microplantilla de la EDAR, pues no hay que

olvidar que los microorganismos, organizados en forma de cadena trófica, son los principales trabajadores responsables del proceso de depuración.

La principal responsabilidad de los operarios y técnicos es la de conducir este microuniverso que conforman los lodos activos, controlando el ambiente en el que se ha de desarrollar la población de microorganismos. El objetivo final es constituir un ecosistema particular y estable, que elimine de un modo óptimo los contaminantes del agua y que decante con facilidad.

El proceso intensivo de lodos activos se puede realizar en la EDAR bajo diversas condiciones de operación, en función de la carga de materia orgánica que llega a los microorganismos. La Tabla 11.3 muestra los tres tipos de carga posibles, alta, media y baja, juntamente con los rangos habituales de **edad celular** (*sludge retention time* -SRT) o tiempo medio que los microorganismos pasan dentro del sistema de reacción) y de **carga másica** (*food to microorganism ratio* -F/M), o valor del cociente entre los kg de DBO₅ que llegan diariamente al biorreactor y los kg de microorganismo presentes en el licor mezcla (SSVLM).

Tipo de Carga	SRT (edad celular, días)	F/M (Kg DBO ₅ Kg SSVLM ⁻¹ d ⁻¹)
Alta	3 - 5	0,4 - 1,5
Media	5 - 15	0,2 - 0,4
Baja	15 - 30	0,05 - 0,2

Tabla 11.3.- Cargas típicas del sistema de lodos activos. Fuente: Metcalf and Eddy, 2003.

Según la carga contaminante recibida, así como los criterios finales de tratamiento, el tipo y número de reactores puede ser modificado para establecer distintas configuraciones de operación (Tabla 11.4). Entre las más habituales destacan las siguientes: (i) mezcla completa (MC), (ii) flujo pistón (FP), (iii) estabilización por contacto (EC), (iv) alimentación escalonada (AE), (v) aeración prolongada (AP) y (vi) carruseles de oxidación (CO)

Configuración	SRT	F/M	C _v	SSLM	T _A	R : Q
MC	5 - 15	0,2 - 0,6	800 - 1920	2500 - 4000	3 - 5	0,25 - 1,0
FP	5 - 15	0,2 - 0,4	320 - 640	1500 - 3000	4 - 8	0,25 - 0,75
EC (estab.)	5 - 15	0,2 - 0,6	960 - 1200	4000 - 10 000	3 - 6	0,5 - 1,5
AE	5 - 15	0,2 - 0,4	640 - 960	2000 - 3500	3 - 5	0,25 - 0,75
AP	20 - 30	0,05 - 0,15	160 - 400	3000 - 6000	18 - 36	0,5 - 1,5
CO	10 - 30	0,05 - 0,3	80 - 480	3000 - 6000	8 - 36	0,75 - 1,5

Tabla 11.4.- Parámetros de diseño de las principales configuraciones de lodos activos. SRT: edad celular en días; F/M: carga másica en Kg DBO₅ Kg SSVLM⁻¹ día⁻¹; C_v: carga volumétrica en Kg DBO₅ día⁻¹ m⁻³; sólidos en suspensión en el licor mezcla en mg l⁻¹; t_A: tiempo de aireación en horas; R:Q: cociente entre caudales de recirculación y de entrada. Fuente: Metcalf and Eddy, 2003.

Cuando la EDAR se fija como objetivo la eliminación biológica del nitrógeno y del fósforo, hay que modificar significativamente la configuración de los sistemas convencionales de lodos activos, para crear distintos ambientes y facilitar de este modo que se lleven a cabo las reacciones pertinentes. Para la eliminación del nitrógeno, se debe convertir el amonio del influente a sus formas oxidadas (nitrito y nitrato), reacción que llevan a cabo microorganismos autotróficos y, posteriormente, reducir de nuevo estas especies a nitrógeno gas, que se escapa a la atmósfera. En este caso, la conversión la llevan a cabo bacterias heterotróficas facultativas, en presencia de materia orgánica, en un ambiente anóxico (ausencia de oxígeno molecular). Las reacciones que rigen los fundamentos biológicos de eliminación del nitrógeno son las siguientes:

- **Nitritación** $NH_4^+ + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O$
- **Nitratación** $NO_2^- + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow NO_3^-$
- **Desnitrificación** $NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$

Para la eliminación biológica del fósforo, se requiere una etapa previa anaeróbica (sin presencia de oxígeno molecular ni nitratos) y rica en fuentes de carbono fácilmente biodegradable (por ejemplo ácidos grasos volátiles y glicógeno, cuyo consumo implica la formación de reservas de PHA y una ligera liberación de fosfatos), seguida de una etapa aeróbica, durante la cual las bacterias acumuladoras de fósforo (*Phosphate Accumulating Organisms* -PAO-) son capaces de consumir las reservas de PHA, formar glicógeno y biomasa, y acumular PO_4^{3-} a unos niveles sensiblemente superiores a los requerimientos metabólicos de las demás especies presentes en la población del sistema de lodos activos. Cabe destacar el hecho de que el fósforo es el único contaminante principal que no es eliminado del proceso por conversión a una fase gas (CO_2 y N_2 para la materia orgánica y el nitrógeno respectivamente), sino que se acumula en el interior de los microorganismos y se elimina a través de la purga. Entre las configuraciones más habituales de una etapa para la eliminación conjunta de materia orgánica y de nutrientes destacan las siguientes: (a) Wuhrmann, (b) Wuhrmann modificado, (c) Ludzack-Ettinger, (d) Bardenpho, (e) Bidentro, (f) Phostrip y (g) SBR (*Sequencing Batch Reactor*).

11.4 Sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales

Tal y como se ha descrito con anterioridad, los procesos de tratamiento de aguas residuales basados en el sistema de lodos activos se caracterizan por una intensificación del proceso biológico que, de forma natural, puede producirse en el medio acuático. Esta intensificación implica una reducción del espacio necesario para llevar a cabo el proceso de depuración, así como la posibilidad de realizar un control más estricto y óptimo del proceso, al disponerse de

instrumentos para medir y regular las variables clave del proceso (como el oxígeno aportado, el caudal de recirculación, el tiempo de retención celular, etc.). Sin embargo, este aumento del rendimiento del proceso conlleva un aumento del coste, no tan sólo de operación y consumo energético, sino también de inversión y de mantenimiento.

Frente a los inconvenientes de estos sistemas intensivos, se han ido proponiendo **sistemas naturales de tratamiento de las aguas residuales**, también llamados **sistemas blandos, extensivos o no convencionales**, que se basan en el uso de componentes o matrices naturales. Normalmente, estos sistemas son construcciones artificiales, pero aprovechan la posibilidad de depuración que ofrece el suelo cuando el agua se infiltra a su través y, muy especialmente, cuando el suelo soporta cultivos.

Existen distintas tecnologías consideradas sistemas naturales. Dado que es difícil que alcancen rendimientos elevados por unidad de volumen, requieren grandes extensiones de terreno y suelen llevar asociado un sistema de pretratamiento que reduce la cantidad y el tamaño de los sólidos. El control del proceso es más difícil que en los sistemas intensivos, ya que se dispone de menos posibilidades de actuación frente a determinadas perturbaciones. La Tabla 11.5 recoge la comparación entre los sistemas intensivos y los naturales.

Sistemas intensivos	Sistemas naturales
Procesos artificiales y acelerados	Componentes naturales
Gasto importante debido al requerimiento de energía eléctrica para el mezclado y el aporte de oxígeno disuelto	Aprovechamiento de energía natural (solar)
Importante obra civil (cemento para los tanques) y equipamiento mecánico (sistemas de agitación, estaciones de bombeo, etc.)	Obra civil limitada al movimiento de tierras
Mínima ocupación de espacio	Requerimiento significativo de ocupación de espacio
Requerimiento de mano de obra (y supervisión) muy especializada	Requerimiento de mano de obra de formación básica respecto a los procesos naturales
Posibilidad de incidir y actuar sobre el proceso en un tiempo de reacción corto mediante la instalación de sistemas de monitorización y control automático	Mecanismos de depuración con mucha inercia, y poca posibilidad de afrontar perturbaciones de dinámica rápida
Elevados costes de mantenimiento debido a la gran cantidad de componentes mecánicos	Integración en el medio natural

Tabla 11.5.- Comparación entre los sistemas de depuración de aguas intensivos y naturales. Elaboración propia.

Los sistemas naturales se pueden clasificar de múltiples formas, una de las cuales se basa en el tipo de biomasa. Así podemos distinguir:

- **Sistemas con biomasa fija.** La biomasa (**biopelícula**) se desarrolla sobre un medio de soporte natural (grava, arena, suelo natural, raíces, etc.). Entre otros, incluyen la **infiltración-percolación**, los **filtros subterráneos**, los **humedales** y los **filtros verdes**.
- **Sistemas con biomasa libre.** Son cultivos libres, donde la biomasa se desarrolla en suspensión en el medio. Los más populares son los **lagunajes**, que pueden ser convencionales o de alto rendimiento.

A continuación, se realiza una breve descripción técnica de las tecnologías naturales de mayor implantación y aceptación.

Sistemas	Ventajas	Inconvenientes
Infiltración-percolación	Requerimiento de espacio medianos Rendimientos de depuración elevados Nitrificación muy elevada	Sensible a cambios climáticos Sensible a sobrecargas hidráulicas Problemas de colmatación (si hay falta de mantenimiento o el primario es deficiente)
Filtros subterráneos	Integración paisajística (si se planta en superficie) Rendimientos de depuración elevados Requerimiento de espacio medianos	Dificultad en detectar y tratar problemas de funcionamiento/falta de visibilidad del sistema de distribución (especialmente de colmatación) Problemas de colmatación (si hay falta de mantenimiento o el primario es deficiente) Sensible a sobrecargas hidráulicas
Humedales	Gran integración paisajística Mas adaptable a sobrecargas hidráulicas Nitrificación muy elevada (con filtros verticales)	Sensible a cambios climáticos Problemas de colmatación en los subsuperficiales horizontales (si hay falta de mantenimiento o el primario es deficiente) Poca experiencia real en sistemas de flujo vertical
Filtros verdes	Sistema de evacuación/tratamiento simultaneo Gran integración paisajística Posible explotación de la vegetación Adaptación a sobrecargas hidráulicas estivales	Su implantación depende de las condiciones del suelo y subsuelo Requerimientos de espacio muy elevados Sensible a cambios climáticos

Tabla 11.6.- Principales ventajas e inconvenientes de los sistemas naturales con biomasa fija. Elaboración propia.

11.4.1 Infiltración – percolación

La infiltración-percolación es un proceso de depuración biológica en medio granular fino (en general arena aportada), en el que las cargas hidráulicas aplicadas no exceden valores del orden de los centenares de litros por metro cuadrado. Desde un punto de vista práctico, el agua residual, que ha sido parcialmente depurada con anterioridad en un tratamiento primario o secundario, se filtra de manera programada y discontinua en lechos de arena que se mantienen en condiciones de no saturación (de este modo se permite la libre circulación y el intercambio de gases) (Figura 11.2). La infiltración-percolación permite alcanzar tres objetivos principales de depuración:

- Una eliminación prácticamente total de los sólidos en suspensión
- Una oxidación de la materia orgánica y del nitrógeno, de manera que la DQO y el NKT en el agua filtrada son inferiores a los 60 y 10 mg l⁻¹ respectivamente (la mayor parte del nitrógeno se oxida biológicamente a nitrato)
- Una reducción muy importante del número de gérmenes patógenos. Esta es quizás la propiedad más remarcable de este proceso.

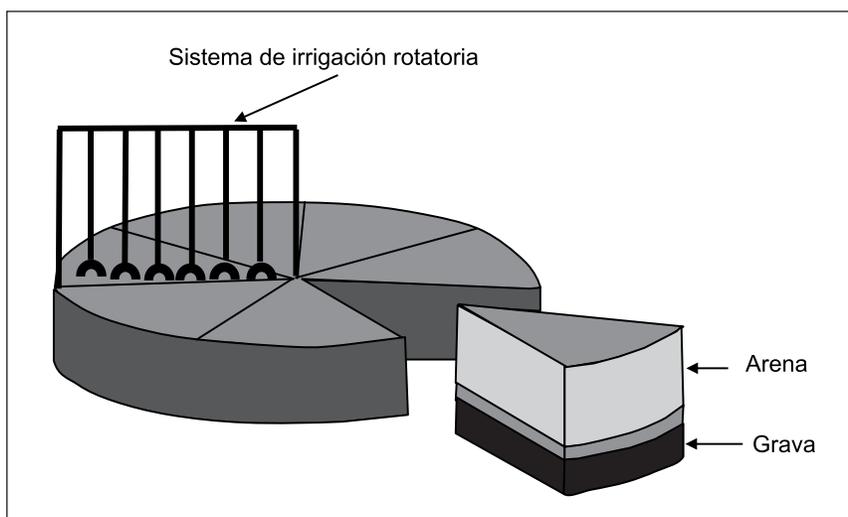


Figura 11.2.- Esquema del sistema de infiltración – percolación. Fuente: Material del Laboratorio de Ciencias del Suelo, Facultad de Farmacia, Universidad de Barcelona.

11.4.2 Filtros subterráneos

Conocidos también como **lechos de arena**, son sistemas que utilizan el suelo aportado (arena con permeabilidad y características controladas) como método de tratamiento, con un sistema de aplicación subsuperficial del agua. Este tipo de tratamiento es adecuado para pequeños núcleos (de menos de 300 habitantes equivalente). Se suelen utilizar cuando el tipo de terreno imposibilita la infiltración subsuperficial, debido a su baja o excesiva permeabilidad, o cuando no se dispone de un terreno suficientemente grande.

El principio de depuración se basa en una filtración lenta a través de un medio granular fino (la arena), que sirve de filtro físico y de soporte a las reacciones biológicas de carácter aeróbico. El material filtrante se encuentra cubierto por una capa de grava y otra de tierra vegetal, con el objeto de mejorar la integración con el paisaje. El sistema de drenaje es opcional pero, si no se instala, hay que vigilar la distancia respecto a las aguas de los acuíferos cercanos, así como su posible impacto.

11.4.3 Humedales

Se denomina **humedal** (*wetland*) a cualquier depresión en la que el agua se acumula varios días durante el periodo de crecida (**hidroperiodo**) y donde se establece una determinada flora acuática y el suelo se encuentra suficientemente saturado de agua, hecho que permite la actividad bacteriana (Figura 11.3). Los humedales artificiales son sistemas diseñados y construidos con el fin de reproducir de un modo más controlado los procesos de autodepuración que se producen en los humedales naturales. Los mecanismos de depuración en los humedales son complejos y engloban la oxidación bacteriana, la filtración, la sedimentación y la precipitación química. Las zonas aeróbicas se encuentran situadas alrededor de las raíces y de los rizomas, donde se desarrollan las correspondientes especies bacterianas (las mismas que se desarrollan en los sistemas intensivos convencionales).

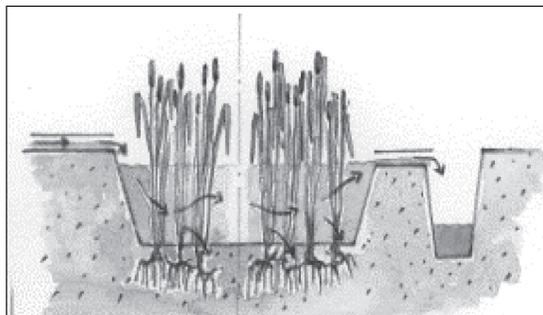


Figura 11.3.- Esquema simplificado de un humedal. Fuente: Brix, 1993.

11.4.4 Filtros verdes

Consisten en la aplicación de agua residual sobre un terreno con vegetación cultivada (Figura 11.4). Los filtros verdes, al igual que todos los sistemas que impliquen aplicación de las aguas al terreno, no deben considerarse tan solo sistemas de tratamiento de aguas residuales, sino también sistemas de eliminación/dispersión de los efluentes. Son, por lo tanto, sistemas muy adecuados allí donde el medio receptor es sensible a la eutrofización. La elección de este sistema dependerá tanto de las características hidrogeológicas (especialmente por lo que respecta a la cercanía de los acuíferos) como de la capacidad de infiltración del suelo y del subsuelo.

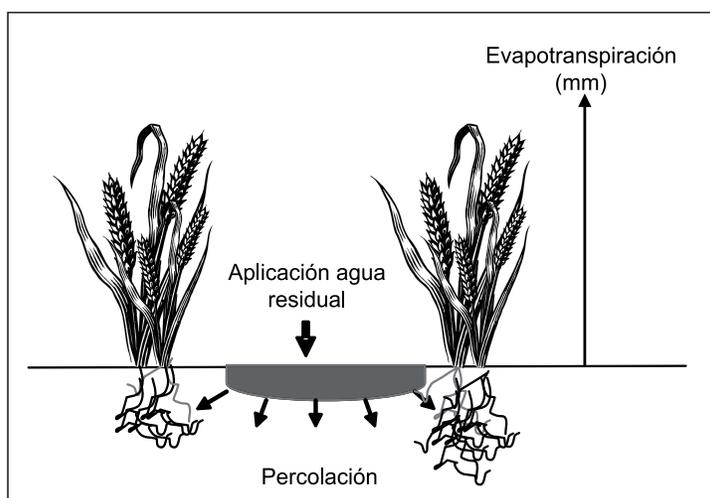


Figura 11.4.- Esquema de funcionamiento de los filtros verdes. Fuente: Turon, 2007.

La depuración se consigue por la acción combinada del suelo (filtración, adsorción, precipitación, etc.), de los cultivos, habitualmente chopos u otros árboles con evotranspiración elevada (captación de nutrientes, acción de las raíces, etc.) y de la microbiota asociada (degradación, asimilación, etc.). La combinación suelo-vegetación reduce las concentraciones de nutrientes, de materia orgánica y de microorganismos patógenos e indicadores en el efluente. Los filtros verdes también sirven para reducir la erosión del suelo y ayudan a mantener su permeabilidad. La absorción por las raíces de las plantas reduce la cantidad de agua que se infiltra, disminuyendo la posibilidad de problemas de sobresaturación. Este efecto es máximo en el periodo de presencia de hojas en el árbol. Para optimizar los sistemas reduciendo la superficie utilizada, son útiles los cultivos que admiten altas cargas de aplicación, con elevadas tasas de asimilación de nutrientes y de consumo de agua y con elevada tolerancia a

las diversas condiciones de humedad. Estos cultivos pueden ser agrícolas (por ejemplo cereales) o forestales (principalmente árboles de hoja caduca como los chopos).

La Tabla 11.7 recoge las principales ventajas e inconvenientes de los diferentes sistemas mencionados hasta ahora, denominados globalmente **sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales con biomasa fija**.

Sistemas	Ventajas	Inconvenientes
Lagunaje (convencional)	Gran adaptabilidad sobrecargas hidráulicas Explotación muy simple Costes de construcción bajos si no hay problemas de suelo Gran capacidad de desinfección Gran integración paisajística	Calidad variable del efluente según estación (muy sensible a condiciones climáticas) Presencia de algas en el efluente (si no se aplica un tratamiento posterior) Requerimientos de espacio muy elevados Sensible a efluentes sépticos (riesgo de olores)
Lagunaje de alto rendimiento	Adaptabilidad sobrecargas hidráulicas Requerimientos de espacio medianos Efluente de gran calidad	Costes moderados de explotación Requerimientos energéticos moderados

Tabla 11.7.- Principales ventajas e inconvenientes de los sistemas naturales con biomasa libre. Elaboración propia.

11.4.5 Lagunaje

Las lagunas son balsas artificiales donde el agua residual circula y desde las cuales (después de un tiempo de retención de numerosos días) se descarga el efluente tratado. Los **sistemas de lagunaje** están formados por una serie de balsas construidas por excavación y compactación del terreno, que funcionan como depósitos de almacenamiento. En general, es necesario impermeabilizarlas para proteger la contaminación de las aguas subterráneas. Las lagunas pueden ser anaeróbicas, facultativas o de maduración (aeróbicas). Por norma general, las **lagunas anaeróbicas** y las **lagunas facultativas** se diseñan principalmente para la reducción de materia orgánica, y las **lagunas de maduración** para la reducción de patógenos. Los sistemas de lagunaje son muy simples, tienen un bajo coste de operación y una gran eficacia depurativa. Por el contrario, sus requerimientos de espacio son muy elevados (Figura 11.5). Cabe distinguir dos tipos principales de lagunaje:

- **Lagunaje natural**, sin requerimiento energético extra
- **Lagunaje artificial**, con requerimiento artificial de oxígeno (**lagunas aireadas**) o con agitación (**lagunas de alto rendimiento**), donde la mezcla permite distribuir homogéneamente las algas y aumentar su contacto con la luz

Al margen de esta primera distinción, las lagunas también se pueden clasificar de formas muy diversas como, por ejemplo, en función de la actividad microbiológica principal (de oxidación, de fermentación ácida, de fermentación de metano, de algas, de maduración, etc.). La Tabla 11.7 recoge las principales ventajas de los dos tipos de lagunaje, o **sistemas de depuración naturales con biomasa libre**.

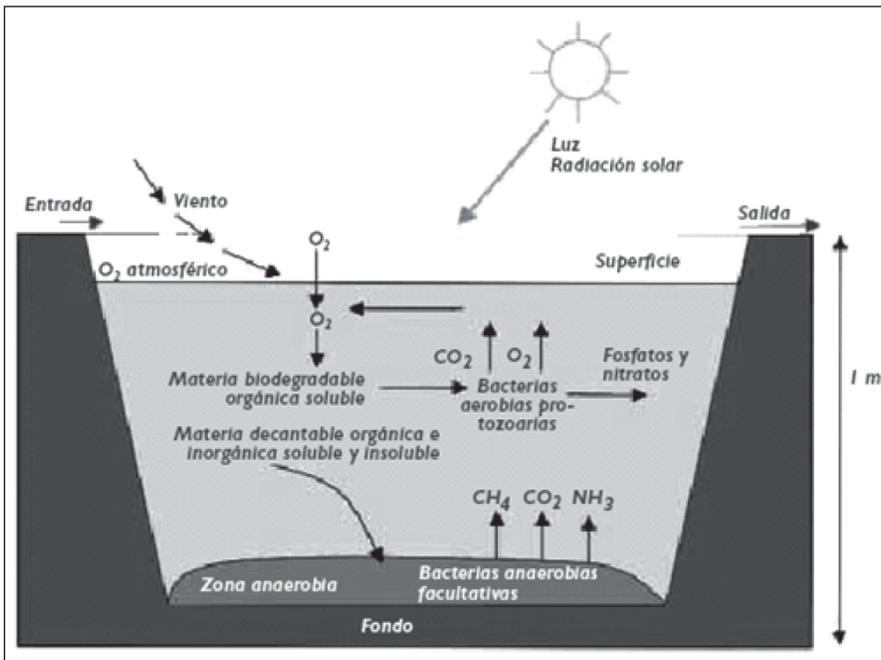


Figura 11.5.- Esquema general de funcionamiento del lagunaje. Fuente: CTGREF d'Aix en Provence, 1979.

11.5 Referencias

- Alexandre O., Boutin C., Duchène P., Lagrange C., Lakel A., Liénard A. et Orditz D. (1998). “Filières d’épuration adaptées aux petites collectivités”. Document technique FNDAE n° 22. Cemagref Editions. Lion (France). ISBN: 2-85362-495-1.
- Comisión Europea (2001). “Procesos extensivos de depuración de las aguas residuales adaptadas a las pequeñas y medias colectividades”. Oficina de publicaciones oficiales de las comunidades europeas. ISBN: 92-894-1690-4.
- Crites R. y Tchobanoglous G. (2000). “Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados”. McGraw-Hill Interamericana, S.A.. Santafé de Bogotá (Colombia).
- EPA (1999). “Manual of Wastewater treatment / disposal for small communities”. EPA/625/R-92/005. U.S. Environmental Protection Agency – Office of Research and Development. Office of Water. Washington DC 20460.
- Ferrer J. y Seco A. (2003). “Tratamientos biológicos de aguas residuales”. Editorial Universidad Politécnica de Valencia, ref. 2003.358. Valencia.
- Grady Jr. C.P.L., Daigger G.T. and Lim H.C. (1999). “Biological Wastewater Treatment”. 2nd edition, Marcel Dekker Inc. New Cork.
- Metcalf and Eddy (2003). “Wastewater Engineering. Treatment and Reuse”. 4th edition, McGraw-Hill. New Cork.
- Poch M. (1999). “Las Calidades del Agua”. Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya, Editorial Rubes. Barcelona.
- Reed, S.C. and R.W. Crites, E.J. (1995). “Natural systems for Waste Management and Treatment”. Second Edition. McGraw Hill Co. New York, New Cork.
- Rodríguez-Roda I. (1998). “Desenvolupament d’un protocol per l’aplicació de sistemes basats en el coneixement a la gestió d’estacions depuradores d’aigües residuals urbanes”. Tesis Doctoral, Programa de Doctorado en Ingenieria Industrial, Universitat de Girona.
- Turon C. (2007). “EDSS-maintenance prototype: an environmental decision support system to assess the definition of operation and maintenance protocols for horizontal subsurface constructed wetlands”. Programa de Doctorado en Medio Ambiente, Universitat de Girona.
- WEF (1996). “Operation of Municipal wastewater treatment plants”. Manual of Practice 11. 5th edition, Water Environment Federation. Alexandria.
- WEF (2000). “Natural Systems for Wastewater Treatment”. Water Environment Federation WEF Manual of Practice FD-16.