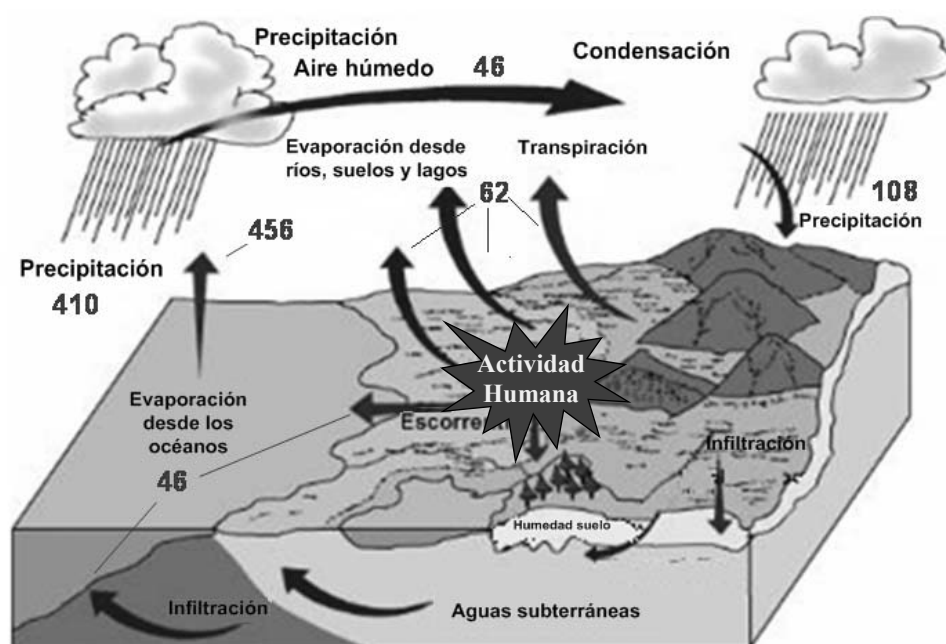


Tema 7 - Depuración de Aguas Residuales

Ciclo hidrológico



cantidades en miles de km³/año

El flujo de agua entre **Tierra – Océanos** y **Atmósfera** es muy elevado

El **volumen total de agua** es de 1408 millones de km³

Alteración del Agua

Puede ser provocada por **causas naturales o geoquímicas** o por la **actividad del hombre**. Ambas dan lugar a alteraciones físicas, químicas y/o biológicas.

- **Alteraciones físicas:**

- *Color*
- *Olor*
- *Sabor*
- *Temperatura*
- *Materia en suspensión*
- *Radioactividad*
- *Formación de espumas*

- **Alteraciones químicas:**

- *Producidas por los compuestos químicos vertidos a las aguas (ver tabla en página 98 de los apuntes de la asignatura).*

- **Alteraciones biológicas:**

- *Aumento de la presencia de bacterias patógenas, virus, etc. capaces de producir enfermedades, y por otra parte la ausencia de animales y plantas por consumir el oxígeno disuelto necesario para la vida en el seno del agua.*

Caracterización de las aguas residuales

Sólidos Totales (ST)

materia que permanece como residuo seco después de evaporar el agua de la muestra a 103-106°C.

↓
Filtro 1.2 μm

↙ pasa ↘ no pasa

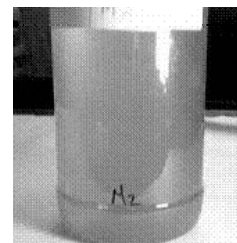
Sólidos Filtrables (SF)

Los SF constan de sólidos coloidales(*) y disueltos

Los sólidos disueltos están formados por moléculas orgánicas e inorgánicas e iones en disolución.

Sólidos en Suspensión Totales (SST)

Los SST pueden ser sedimentables o no.



Muestra de agua residual



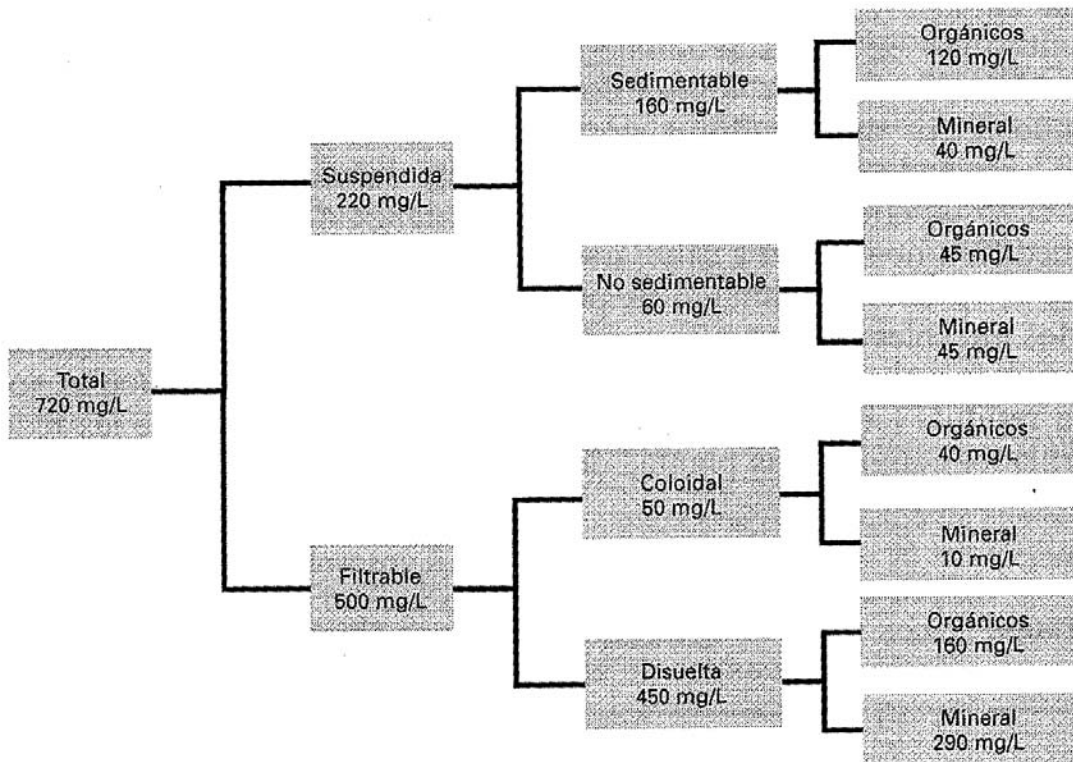
Estufa de desecación

(*)Un coloide es un tipo de mezcla en la que una sustancia (fase dispersa) se encuentra uniformemente distribuida dentro de otra (fase continua). Un sistema coloidal es por tanto bifásico y la fase dispersa ha de tener tamaños del orden de micras, es decir de 10^{-9} m (1 nm) a 10^{-6} (1 μm).

NO ES POSIBLE ELIMINAR LA FRACCIÓN COLOIDAL POR SEDIMENTACIÓN

Caracterización de las aguas residuales

Clasificación media de los sólidos presentes en las aguas residuales



Caracterización de las aguas residuales

Materia orgánica

Es la parte de los sólidos totales que se oxida y se convierte en gas a una temperatura de 600°C mientras que la parte que permanece como ceniza sería la parte inorgánica o mineral. Suele representar el 50% de los sólidos totales. Su composición es la siguiente:

- proteínas (40 a 60%)
- hidratos de carbono (25 a 50%)
- grasas y aceites

Además es posible encontrar pequeñas cantidades de sustancias orgánicas, tales como tensioactivos, fenoles, pesticidas, etc. Algunas de estas sustancias son tóxicas para los organismos acuáticos, y además pueden ser de difícil biodegradación.

El problema de la materia orgánica es al ser degradada (incluso has su mineralización o transformación en CO₂) se consume el oxígeno disuelto en el agua, reduciendo por tanto la cantidad del mismo. Esto impide supone una seria amenaza para la vida acuática, ya que un agua con menos de 4 mg/L de oxígeno disuelto no es apta para el desarrollo de la vida en ella.

Caracterización de las aguas residuales

Formas de evaluar la materia orgánica

- **Pérdida de peso al rojo:** se realiza por evaporación de un volumen de agua a 110°C y calcinación posterior del residuo seco.
- **Demanda Química de Oxígeno, DQO:** es la cantidad de O₂ en mg/L, consumido por la materia oxidable presente en la muestra, sin intervención de organismos vivos. Se suele obtener mediante ensayos con dicromato potásico o permanganato potásico.
- **Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO:** es la cantidad de O₂ en mg/L necesaria para descomponer la materia orgánica del agua por parte de los microorganismos presentes en ella y de forma aerobia. Se realiza en dos etapas: en la primera se oxidan principalmente los compuestos carbonados y en la segunda los nitrogenados, por ello la DBO cambia con el tiempo y también con la temperatura, por lo que se acepta como índice normalizado la DBO₅, que se determina mediante un periodo de incubación de 5 días a 20°C.

Valores típicos de DBO₅ en aguas limpias y residuales urbanas

DBO₅ < DQO

Aguas de manantial	< 1 mg/L
Río moderadamente contaminado	2 – 8 mg/L
Agua residual urbana sin tratar	200 – 600 mg/L
Agua residual urbana tratada	20 mg/L

Caracterización de las aguas residuales

Valores típicos de DQO y DBO de efluentes de industrias agroalimentarias.
(adaptada de Fuller y Warrick, 1985 y Cuadros García, 1989)

Agua Residual	DQO, mg/L	DBO ₅ , mg/L
Alpechín	45000 – 130000	35000 – 100000
Vinaza	80000	40000
Comidas preparadas	–	1900
Salsas y aderezos	–	2600
Especialidades cárnicas	–	820
Pescados y verduras	–	387
Frutas y verduras	582	–
Queso y leche en polvo	1062	–

FULLER, W.H. y WARRICK, A.W. 1985. "Soils in waste treatment and utilization". CRC Press Inc. Boca Raton, Florida.

CUADROS GARCÍA, S. 1989. Utilización agrícola de residuos líquidos. En "Residuos Urbanos y Medio Ambiente" (Ed.: I. Herráez, J. López, L. Rubio y M.E. Fernández). Ediciones Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, págs.: 202-222.

Caracterización de las aguas residuales

Formas de evaluar la materia orgánica



Equipo para medida de la DBO_5



Equipo para medida de la DQO

Caracterización de las aguas residuales

Otros índices importantes

- **Oxígeno disuelto**
- **Cloro residual**
- **Nitrógeno**
- **Sulfuros**
- **Cianuros**
- **Fenoles**
- **Metales pesados:** arsénico, cinc, cromo, plomo, selenio, berilio, cadmio, mercurio, níquel y plata.
- **Fluoruros**

Sobre vertido de aguas residuales en aguas continentales, a nivel nacional, la norma de referencia es el REAL DECRETO 606/2003, de 23 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (BOE núm. 135, 6 junio 2003)

Para una mayor información y descripción de las técnicas analíticas para la determinación de los parámetros anteriores, consultar el libro:

AGUAS POTABLES DE CONSUMO PÚBLICO Y AGUAS DE BEBIDA ENVASADAS

<http://www.panreac.com/new/esp/publicaciones/publicaciones01.htm>

Clasificación de las aguas residuales

Urbanas

- Predominio de materia orgánica biodegradable
- Gérmenes patógenos y no patógenos
- Caudal función del nivel de vida y de población
- Necesidad de plantas de tratamiento municipales
- Las aguas tratadas han de llegar a los cauces naturales sin carga contaminante e incluso ser reutilizadas (por ejemplo para riego).

REAL DECRETO 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.

BOE núm. 77 de 29 de marzo de 1996

ANEXO I

Requisitos de los vertidos de aguas residuales

Cuadro 1

Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas. Se aplicará el valor de concentración o el porcentaje de reducción.

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción (1)	Método de medida de referencia
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO 5 a 20 °C) sin nitrificación (2).	25 mg/l O ₂	70-90 40 de conformidad con el apartado 3 del artículo 5 R.D.L. (3).	Muestra homogeneizada, sin filtrar ni decantar. Determinación del oxígeno disuelto antes y después de cinco días de incubación a 20 °C ± 1 °C, en completa oscuridad. Aplicación de un inhibidor de la nitrificación.

Clasificación de las aguas residuales

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción (1)	Método de medida de referencia
Demanda química de oxígeno (DQO).	125 mg/l O ₂	75	Muestra homogeneizada, sin filtrar ni decantar. Dicromato potásico.
Total de sólidos en suspensión.	35 mg/l (4) 35 de conformidad con el apartado 3 del art. 5 R.D.L. (más de 10.000 h-e) (3). 60 de conformidad con el apartado 3 del art. 5 R.D.L. (de 2.000 a 10.000 h-e) (3).	90 (4) 90 de conformidad con el apartado 3 del art. 5 R.D.L. (más de 10.000 h-e) (3). 70 de conformidad con el apartado 3 del art. 5 R.D.L. (de 2.000 a 10.000 h-e) (3).	Filtración de una muestra representativa a través de una membrana de filtración de 0,45 micras. Secado a 105 °C y pesaje. Centrifugación de una muestra representativa (durante cinco minutos como mínimo, con una aceleración media de 2.800 a 3.200 g), secado a 105 °C y pesaje.

(1) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada.

(2) Este parámetro puede sustituirse por otro: carbono orgánico total (COT) o demanda total de oxígeno (DTO), si puede establecerse una correlación entre DBO 5 y el parámetro sustituto.

(3) Se refiere a los supuestos en regiones consideradas de alta montaña contemplada en el apartado 3 del artículo 5 del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre.

(4) Este requisito es optativo.

Los análisis de vertidos procedentes de sistemas de depuración por lagunaje se llevarán a cabo sobre muestras filtradas; no obstante, la concentración de sólidos totales en suspensión en las muestras de aguas sin filtrar no deberá superar los 150 mg/l.

Cuadro 2

Requisitos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas realizadas en [REDACTED] cuyas aguas sean eutróficas o tengan tendencia a serlo en un futuro próximo. Según la situación local, se podrá aplicar uno o los dos parámetros. Se aplicarán el valor de concentración o el porcentaje de reducción.

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción (1)	Método de medida de referencia
Fósforo total.	2 mg/l P (de 10.000 a 100.000 h-e). 1 mg/l P (más de 100.000 h-e).	80	Espectrofotometría de absorción molecular.
Nitrógeno total (2).	15 mg/l N (de 10.000 a 100.000 h-e). 10 mg/l N (más de 100.000 h-e) (3).	70-80	Espectrofotometría de absorción molecular.

(1) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada.

(2) Nitrógeno total equivale a la suma del nitrógeno Kjeldahl total (N orgánico + NH₃), nitrógeno en forma de nitrato (NO₃) y nitrógeno en forma de nitrito (NO₂).

(3) Alternativamente el promedio diario no deberá superar los 20 mg/l N. Este requisito se refiere a una temperatura del agua de 12 °C o más durante el funcionamiento del reactor biológico de la instalación de tratamiento de aguas residuales. En sustitución del requisito relativo a la temperatura, se podrá aplicar una limitación del tiempo de funcionamiento que tenga en cuenta las condiciones climáticas regionales. Se aplicará esta alternativa en caso de que pueda demostrarse que se cumple el apartado A)1 del anexo III.

Clasificación de las aguas residuales

Sector Primario

Agrícolas

La **agricultura tradicional** emplea elevadísimas cantidades de agua, pero no causa contaminación importante en las mismas, aunque esto dependerá del uso que haga de fertilizantes y pesticidas.

La **agricultura intensiva**, como la de invernadero, hace un uso considerable, a veces excesivo, de abonos químicos y plaguicidas, sin embargo aprovecha muy bien el agua, realizando vertidos mínimos.

En cualquier caso es necesario formular nuevos fertilizantes y pesticidas cuyos efectos perjudiciales sean mínimos o bien desarrollar de especies vegetales resistentes a las plagas y que requieran una dosis mínima de pesticidas y plaguicidas

Ganaderas

Las explotaciones ganaderas resultan especialmente contaminantes debido a los excrementos de los animales (denominados purines, aunque esta palabra se aplica fundamentalmente a los del cerdo), cuya DBO₅ puede ser tan alta como 15000 mg/L

Mineras

Las aguas residuales pueden contener metales pesados, muy tóxicos. Recuérdese el desastre de Aznalcóllar en abril de 1998

Clasificación de las aguas residuales

Aguas residuales industriales

Uso del agua en la industria:

- Como vehículo para la transmisión del calor: la tendencia actual es a la recirculación, que se hace imprescindible en el caso de vapor de calefacción, dados los rigurosos requerimientos de pureza para el agua de alimentación a las calderas. Sin embargo, en la industria energética el volumen de agua vertida es importante y se puede determinar un tipo de contaminación especial, **contaminación térmica**, por su temperatura, 10°C superior al ambiente en las centrales térmicas y 13°C en las nucleares.
- En los procesos de fabricación, como materia prima o disolvente.
- Lavado y aclarado de materias primas y productos
- Como servicio en todas las instalaciones y dependencias

Cada uno de estos usos supone la contaminación del agua, que en algunos casos, variará en función de la industria que se trate.

Todas las industrias han de ajustarse a los requerimientos legales de vertido, que suponen un costo adicional al de producción en muchos procesos (RD 606/2003).

Procesos de depuración de aguas residuales

Un proceso de depuración de aguas residuales se puede considerar como un conjunto de operaciones unitarias físicas, químicas y/o biológicas que permite eliminar del agua residual aquellas sustancias que son perjudiciales para su destino posterior y además tratar adecuadamente los fangos obtenidos para transformarlos en un residuo inocuo.

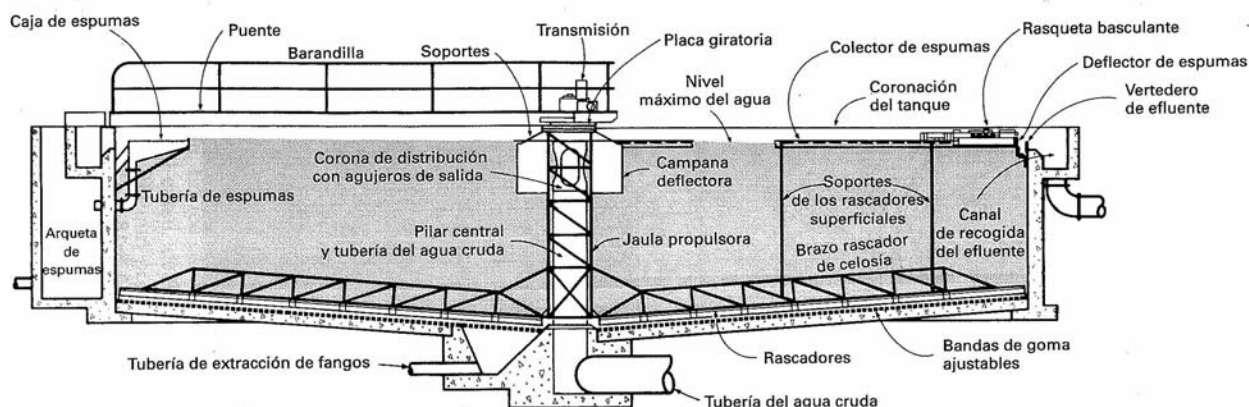
Se pueden distinguir fundamentalmente tres niveles de depuración:

- a) Pretratamientos:** En ellos se eliminan aquellos materiales arrastrados por las aguas, tales como ramas, trapos, tierra, e incluso grasas, que puedan suponer un problema para las posteriores operaciones de depuración.
- b) Nivel de depuración primario:** Elimina fundamentalmente los sólidos suspendidos no coloidales, aunque también puede eliminar los presentes en forma coloidal, siempre que se añadan coagulantes.
- c) Nivel de depuración secundario:** se eliminan fundamentalmente los sólidos orgánicos coloidales y las macromoléculas disueltas, usando operaciones biológicas.
- d) Nivel de depuración terciario:** se eliminan las sustancias disueltas de naturaleza orgánica o inorgánica, así como también bacterias y virus. Es un nivel de depuración que no se alcanza normalmente en los tratamientos convencionales.

Procesos de depuración de aguas residuales

Nivel Primario

Sedimentación



Tanque circular de decantación primaria y alimentación central (de Infilco-Degremont).



Sedimentador primario (detalles y puente)



Procesos de depuración de aguas residuales

Nivel primario: COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

La adición de sustancias químicas denominadas coagulantes provoca la floculación de los sólidos coloidales en suspensión. Por *floculación* se entiende el proceso de formación de aglomeraciones (flóculos) por unión de las partículas en suspensión existentes en un líquido.

La adición de coagulantes determinar unas condiciones tales que las partículas en suspensión se unen, lo que facilita su separación por sedimentación o filtración.

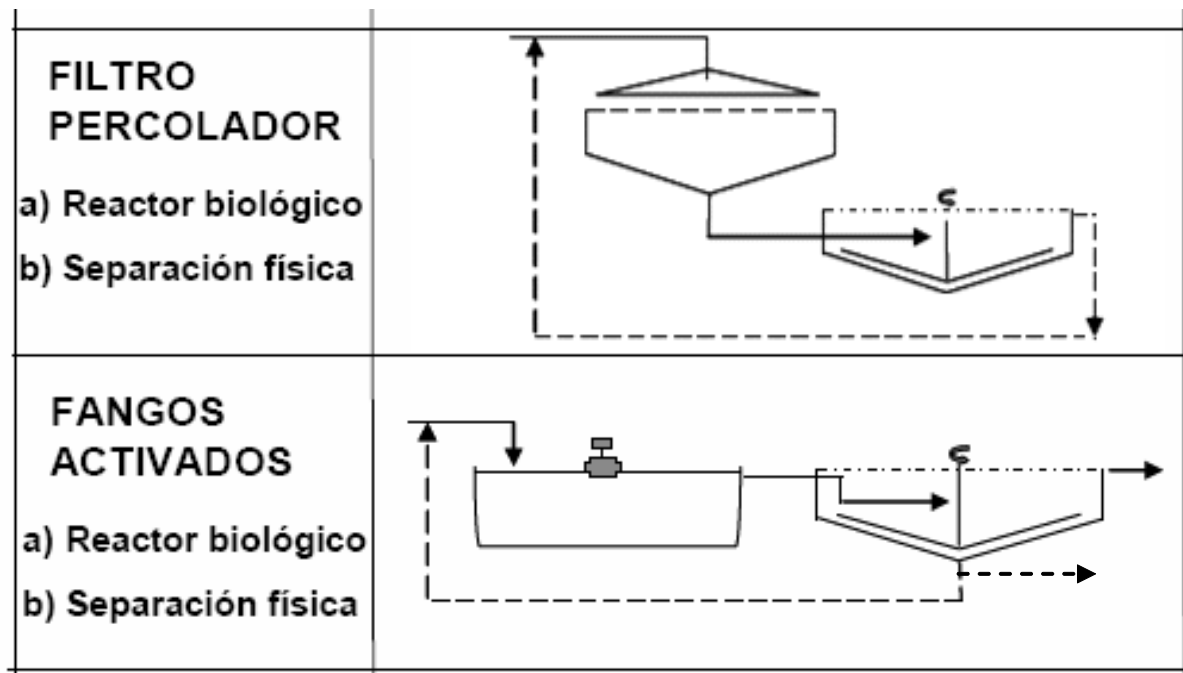
Al ser los coloides de carga negativa los más frecuentes en las aguas residuales se necesitan, para conseguir una buena decantación, coagulantes con varias cargas positivas, por lo que la elección de los mismos queda prácticamente limitada a sales de Fe y de Al y a cal, bien aisladamente o combinados entre sí.

En ocasiones también puede ser necesario suministrar polielectrolitos, que son polímeros orgánicos con cargas positivas y negativas que mejoran el rendimiento económico de la coagulación-floculación.

Entre las ventajas de los procesos de coagulación-floculación están su elevado rendimiento en la eliminación de sólidos en suspensión y materia orgánica frente a la sedimentación convencional y la ausencia de interferencias por la presencia de sustancias tóxicas.

Procesos de depuración de aguas residuales

Nivel Secundario



Procesos de depuración de aguas residuales

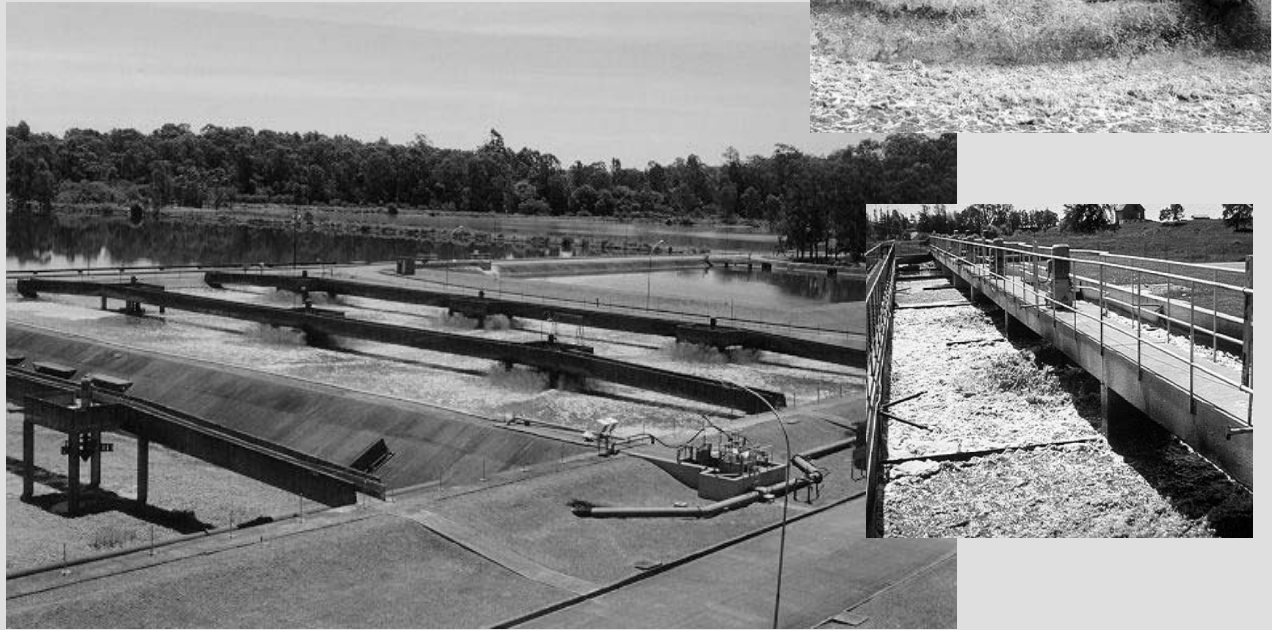
Nivel secundario: Procesos Biológicos

Consiste en la asimilación de la materia orgánica presente en el agua residual mediante microorganismos y en presencia de oxígeno y nutrientes resultando productos finales, nuevos microorganismos y energía.

Se emplean dos procedimientos:

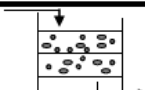
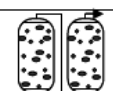
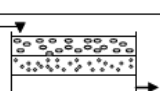

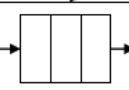
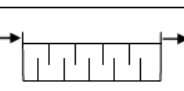
- 1. Filtros percoladores:** La masa bacteriana se desarrolla sobre un soporte fijo, formado por un relleno que actúa de medio filtrante a través del cual se hacen pasar las aguas residuales.
- 2. Fangos activados:** Los microorganismos responsables de la purificación del agua, forman una suspensión de flóculos de gran área superficial sobre los que se absorben los sólidos disueltos y los coloides. Las aguas residuales procedentes del tratamiento primario se mezclan con un 20% en volumen aproximadamente de lodos recirculados y se someten a la oxidación en un reactor biológico con aireación donde se forman unos flóculos constituidos por masas suspendidas de microorganismos, nutrientes y sólidos que son unos centros muy activos de actividad biológica, de aquí proviene la denominación de lodos o fangos activados. El oxígeno necesario se suministra por la aireación y si se introduce agitación mecánica se favorece la velocidad de transferencia de oxígeno al mismo tiempo que se permite mantener unas condiciones uniformes de temperatura y composición en el reactor.

Tanques aireados para el tratamiento biológico (fangos activos) de las aguas residuales



Procesos de depuración de aguas residuales

Nivel Terciario

AIREACIÓN				
ADSORCIÓN POR CARBÓN				
FILTRACIÓN				
CAMBIO IÓNICO				
SEPARACIÓN MEMBRANA				
OXIDACIÓN AVANZADA				
PARTÍCULA TÍPICA ELIMINADA	Gases disueltos	Materia orgánica disuelta	Materia mineral disuelta (iones)	Bacterias, virus, sustancias orgánicas recalcitrantes

Procesos de depuración de aguas residuales

Nivel terciario

Los productos eliminados (materia orgánica disuelta no biodegradable, sólidos en suspensión y sales inorgánicas disueltas) suelen estar en pequeñas concentraciones, lo que hace que su eliminación sea costosa, pero la legislación actual, más severa, determina que haya que recurrir a este nivel de depuración en aras de la preservación del medio ambiente, y sobre todo cuando se pretende la reutilización del agua.

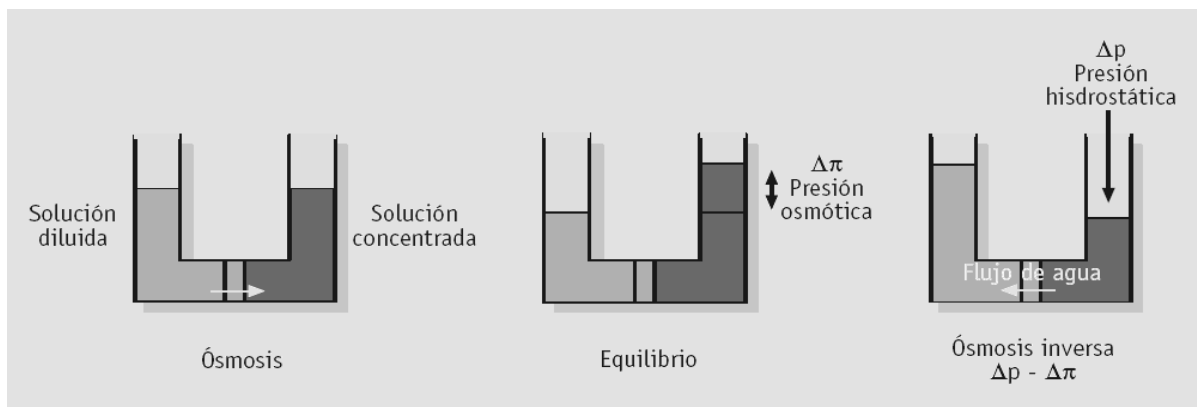
Se usan diferentes técnicas de depuración:

1. **Aireación.**
2. **Adsorción:** Se basa en la retención por la superficie del sólido de moléculas de la disolución por la acción de fuerzas químicas o físicas. Elimina compuestos orgánicos disueltos o resistentes a la degradación biológica, como fenoles, pesticidas e hidrocarburos clorados, así como iones (metales tóxicos, p.ej.). Los productos adsorbentes pueden ser naturales (bentonita) o artificiales (carbón activo).
3. **Filtración:** eliminación de partículas en suspensión de tamaño mínimo.
4. **Cambio iónico:** Se produce un cambio de iones entre los de la disolución y los existentes en una fase sólida finamente dividida llamada resina cambiadora de iones. Las resinas son de dos tipos: aniónicas, que intercambian los aniones del agua por OH^- y catiónicas, que lo hacen con los cationes por H^+ .

Procesos de depuración de aguas residuales

Nivel terciario

5. **Separación por membranas:** Microfiltración, Ultrafiltración y Ósmosis inversa.
6. **Oxidación avanzada:** Emplea oxidantes más poderosos que el oxígeno del aire para descomponer la materia orgánica disuelta no biodegradable, así como para destruir virus y bacterias. Se trata de procesos diseñados para la formación de radicales hidroxilo (HO^\bullet), para lo que se usa ozono, peróxido de hidrógeno, Fe^{2+} y/o radiaciones ultravioleta).



Depuración de aguas residuales: El destino de los lodos

A través de los procesos unitarios de depuración de las aguas residuales se producen unos fangos compuestos por las impurezas eliminadas del agua y por las sustancias producidas o agregadas en ellos, por lo que para completar un sistema de depuración es preciso efectuar un tratamiento adecuado de los fangos producidos.

El objetivo de un tratamiento de fangos es doble: reducir el volumen que se ha de enviar a un destino final previsto y conveniente y modificar las condiciones del fango para que no resulte perjudicial en ese destino. El principal problema que plantea el fango es su contenido en materia orgánica que tiende a descomponerse con los perjuicios consiguientes derivados de una descomposición no controlada.

Las operaciones a las que se somete a los fangos son:

1. **Espesamiento:** Suele realizarse por sedimentación natural, aunque a veces se usa flotación con aire. Consigue eliminar agua, concentrando los fangos.
2. **Procesos de estabilización:** modifican las características del fango, concretamente reducen o eliminan la materia orgánica, para permitir un vertido o destino final que no plantee incidencias perjudiciales sobre el medio natural (a veces no se aplica ninguno de estos tratamientos).
3. **Deshidratación:** Se elimina una mayor cantidad de agua. La deshidratación se puede realizar por medios naturales y por medios mecánicos (filtros de vacío, centrífugas y en ocasiones filtros prensa). Suele ser la etapa final del tratamiento.



***Espesador de gravedad (izquierda)
y de flotación (derecha)***

Depuración de aguas residuales: El destino de los fangos

Procesos de conversión

1. **Digestión anaerobia:** Es realizada por microorganismos anaerobios en ausencia de oxígeno. Destruye parcialmente la materia biodegradable que se convierte en productos estables e inertes al mismo tiempo que se origina un gran desprendimiento de gas (fundamentalmente CH_4 y CO_2), por lo que es además fuente de energía.
2. **Digestión aerobia:** Es una aireación prolongada hasta la reducción de materias volátiles para que no se produzcan olores desagradables y se consiga una descomposición de los sólidos hasta lograr unos lodos prácticamente inertes.
3. **Incineración:** Se utiliza para reducir simultáneamente la materia orgánica y el volumen de fango aunque los subproductos gases y cenizas plantean otro problema de contaminación. Consiste en una combustión a unos 600°C . Si hay suficiente deshidratación, un 30% de sólidos, el proceso es autónomo y sólo necesita combustible adicional para el arranque.

Destino final del fango

1. **Extensión en el suelo** bien como fango digerido con gran cantidad del agua (irrigación) o bien como fango digerido seco.
2. **Lagunaje**, solución aceptable para instalaciones pequeñas en lugares alejados y que puede permanecer en la laguna o ser retirado periódicamente como fango estabilizado.
3. **Vertido controlado** del fango, generalmente tratado, en un área especial, seguida de compactación y cubrimiento con una capa de tierra.



Digestores anaerobios para fangos



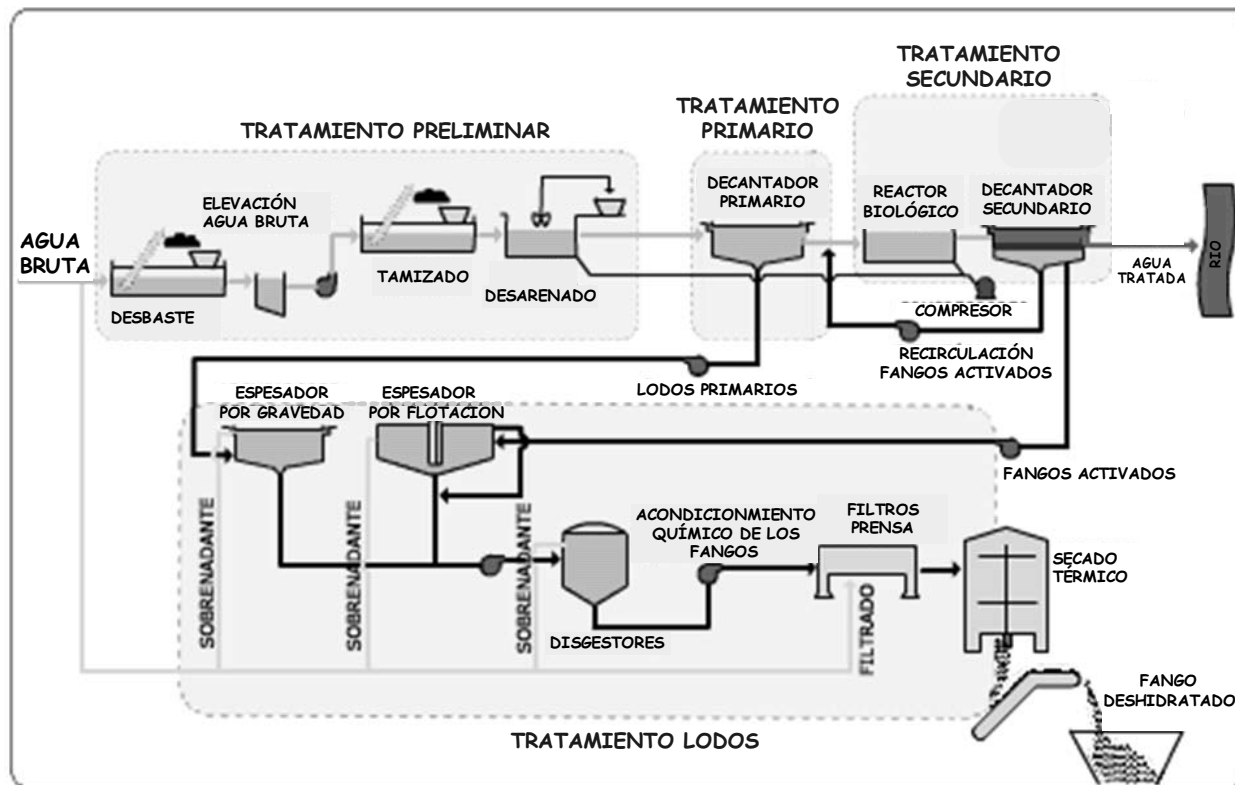
Deshidratación de fangos



***Descarga de
lodos
deshidratados
en remolques***



Ejemplo de proceso completo de depuración de aguas residuales (urbanas)



Visita virtual a EDAR de Granada: http://www.emasagra.es/edar/prop_edar.swf