

Se necesita agua limpia. Tratamientos

Mario Díaz

Universidad de Oviedo y Academia Asturiana de Ciencia e Ingeniería

Resumen- El agua es un recurso básico para el hombre, con todo tipo de consideraciones biológicas, sociológicas, políticas o filosóficas a lo largo de la historia. El aseguramiento de su suministro a una población que ha ido creciendo, dispersa y con mayores necesidades de calidad requiere una organización social, un conocimiento científico y un desarrollo tecnológico complejo de primer orden. Se indican aquí de forma muy resumida, las bases y los procesos industriales para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales, en particular de la materia orgánica que contiene. Se muestra también el interés en las necesidades futuras y algunas opciones para tratarlas

*«Corrientes aguas, puras, cristalinas,
árboles que os estáis mirando en ellas...»*
(Égloga I – fragmento –, Garcilaso de la Vega)

I. INTRODUCCIÓN

I.1. CICLOS BIOGEOQUÍMICOS

Nuestro planeta evoluciona según unos ciclos biogeoquímicos, interaccionando los seres vivos con el entorno físico y entrando en juego numerosos compuestos químicos. Algunos elementos de interés son el carbono, nitrógeno, fósforo que, junto a la molécula de agua, dan lugar a ciclos que involucran la atmósfera, las masas de agua y los suelos. Las interacciones con las distintas matrices ambientales facilitan el acceso de los elementos a los entornos donde se pueden desarrollar los seres vivos, permitiendo la vida. Los seres vivos también participan en los ciclos, siendo el sol el gran motor del proceso.

En forma resumida, el carbono es absorbido como CO₂ en diferentes medios, y durante la fotosíntesis se transforma en materia orgánica que pasa de plantas a herbívoros, volviendo a la atmósfera por respiración o descomposición de seres vivos. Junto con otras contribuciones, debemos considerar su generación por el hombre sobre todo por combustión para producir energía, que influye en muchas alternativas de procesos industriales. Junto con el nitrógeno juega además un papel importante en la fijación del N₂ del aire por las bacterias y las plantas, y el fósforo pasa del suelo a los seres vivos en la cadena alimentaria volviendo al ciclo cuando mueren. El ciclo del agua (hidrológico) involucra suelo (y subsuelo), corrientes de agua y atmósfera, presentándose en los tres estados habituales de la materia, con cambios de fase entre ellos y movimientos en las fases fluidas, con fenómenos tan importantes como la evaporación, la transpiración, la condensación y precipitación, la escorrentía e infiltración (Figura 1).

Todos estos ciclos y otros que parecen menos importantes, están a su vez relacionados entre sí y tienen una implicación importante en los seres vivos, al tiempo que ellos influyen en el ciclo. En 1674 Pierre Perrault (hermano del autor de cuentos, Charles), publicó “De l’origine des fontaines” creando el

concepto ciclo hidrológico (junto a Edmé Mariotte y Edmund Halley) y que, en forma resumida, consiste en que el agua precipitada puede sufrir evaporación y evapotranspiración, escurrirse superficial o subterráneamente.

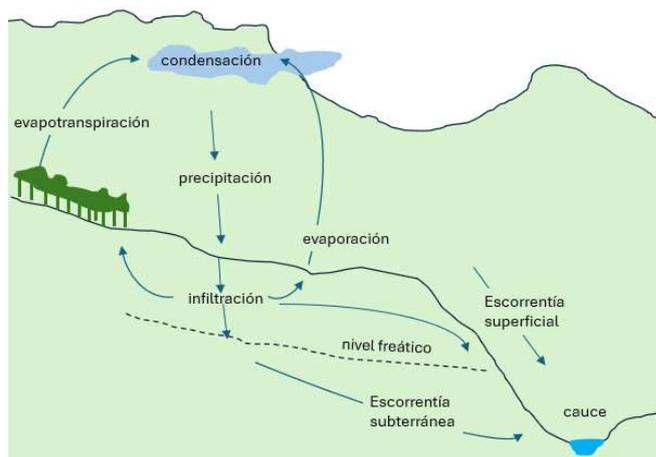


Figura 1. Ciclo básico del agua en la naturaleza

I.2. LAS HISTORIAS DEL AGUA

La necesidad del agua para el hombre ha generado seres mitológicos del agua en distintas culturas. Muchos, como Tláloc, Atabey, Amaru, Yacuruna, o Mamacocha en Iberoamérica, como Coventina para los celtas, o Váruna y Ameonna en Oriente. En general ha solido relacionarse como una fuente de vida, de energía y fecundidad, aunque también en varias religiones como una fuente de destrucción. En una primera aproximación al analizar la naturaleza alejado de lo mítico, buscando los orígenes de la materia, el filósofo presocrático Tales de Mileto (624 a.C.) señalaba al agua como principio de todas las cosas que existen, incluso consideraba que la tierra flotaba sobre agua.

En Asturias la Xana es la figura o diosa más arraigada, joven alegre y símbolo de vida, que habita en el entorno de aguas puras, fuentes, ríos, lagos o pozos (Figura 2). Tiene cierta relación con las náyades, ninfas de agua dulce, en la mitología griega. La cultura asturiana es sobre todo una cultura del agua que ha dado vida, comunicación y energía. La continuidad de su aporte por la lluvia, unos 1100 mm anuales en forma bastante uniforme, ha generado una forma vida, suministrando agua joven, con bajo “tiempo de residencia” y poca transformación. Tal era la dependencia del agua, que los primeros pobladores de Asturias se localizaban en los valles ribereños y en el litoral, en un número muy discutible quizás alrededor de 100 000 personas en la época previa a los romanos, 627000 en 1900 y 1,13×106 en 1981.



Figura 2. Bosquejo de una Xana
y de un artilugio de aprovechamiento energético de agua

Hasta la edad contemporánea, el uso de agua, en forma análoga a regiones vecinas, se refería a los ámbitos: doméstico (preparar alimentos, limpieza, transporte por cargas), ritual (usos periódicos y ocasionales), ganadero (bebida y riego), de la pesca, y de la energía (pisones, molinos, el batán, en particular las ferrerías). En el siglo XIX su uso se fue multiplicando para la producción de electricidad, el transporte fluvial y la minería. El tratamiento del agua era prácticamente nulo, lo que hacía que los problemas, sobre todo de salud, pasasen aguas abajo. El crecimiento de la población y las mayores exigencias de salubridad y calidad de vida en el siglo XX generaron el desarrollo de sistemas de tratamiento cada vez más complejos.

I.3. LA HISTORIA DEL TRATAMIENTO DEL AGUA

Con el inicio de las urbes hace más de 5000 años se comenzó a emplear el tratamiento de aguas para beber, fundamentalmente para eliminar la turbidez. Los egipcios hace 3500 años ya conocían y pintaban en las tumbas el proceso de la coagulación con alúmina para sedimentar partículas. Los asirios transportaban agua en canales hace 2700 años y hace 2500 años Hipócrates ya recomendaba la filtración con filtro de manga. Arquímedes inventó su tornillo para elevar agua, que sigue utilizándose en la actualidad en las plantas de tratamiento. Roma multiplicó los transportes en canales hace 2300 años construyendo acueductos que perduran en nuestra época, utilizándose en la actualidad esquemas análogos para el transporte de agua y en alcantarillados.

Desde la época de los romanos hasta el siglo XVI, no se puso mucha atención técnica al tratamiento de aguas. Sin embargo, la situación no era buena, incluso se dijo que el consumo de cerveza era más garantía para la supervivencia que el de agua, difícil de aceptar por el carácter de consumo alimentario que tiene, y si aceptamos que la población no se pasaba borracha toda la vida. No obstante, quizás más del 95% de la población vivía en el campo con razonable disponibilidad de agua.

Francis Bacon en 1627 intentó eliminar la sal con filtración de arena, fracasando evidentemente, pero abriendo paso a la experimentación. De hecho, la desalinización, ablandamiento de agua no se inventa hasta 1903 utilizando cambiadores iónicos. Los primeros filtros domésticos de agua, de lana y carbón se utilizaron en el siglo XVIII, y ya en 1804 se colocó la primera planta de tratamiento municipal de agua en Escocia. La disponibilidad de energía y el desarrollo industrial comenzaba a favorecer el tratamiento de agua. Los sistemas de transporte resultan siempre muy importantes, y en canales se introdujo el uso de hormigón, con más resistencia y menos problemas de corrosión. También se comenzó a utilizar el bombeo a presión en algunos ámbitos, y las tuberías cogían interés, aunque también se debían evitar problemas de corrosión, alguno ya conocido mucho antes, como el plomo al subir el valor del pH.

En 1854 el médico John Snow (1830-1858) demostró que una epidemia de cólera en Londres se debía al agua procedente del Támesis que debía estar contaminada, lo que marcó la necesidad de mejorar el sistema de alcantarillado, así como el de la potabilización del agua. El interés por la contaminación microbiológica había sido escaso o mejor nulo, hasta el descubrimiento del microscopio por Antoine van Leeuwenhoek en la década de 1670. Snow también utilizó cloro para tratar el agua, siendo el inicio de la desinfección. Estaba claro que el buen sabor del agua no garantizaba su consumo seguro, y comenzaron a aplicarse filtros de arena y cloración en los tratamientos de agua municipales. A finales del siglo XIX en Estados Unidos se comenzaron a substituir los filtros de arena profundos, de baja velocidad, por los rápidos con limpieza más frecuente. También dio comienzo a la introducción de normativas legales para el uso de agua por el público, y el cólera y la fiebre tifoidea comenzaron a decaer en el mundo con la cloración del agua. En 1902 se comenzó a utilizar en Bélgica hipoclorito cálcico y cloruro férrico para desinfección y coagulación, y en 1906 se comenzó a probar ozono como desinfectante en Francia.

Las primeras normativas, incluyendo coliformes, llegan en 1914 y en 1972 aparece la norma CWA (*Clean Water Act*) en Estados Unidos. El interés se ha ido concentrando en la contaminación de origen humano, e industrial, en los productos orgánicos y específicos como pesticidas. Las plantas de tratamiento han crecido incluyendo procesos como floculación, aeración, sedimentación, adsorción en carbón activo además de en arena, y a partir de la década de los 80 del siglo pasado con el uso de membranas sobre todo de ósmosis inversa.

La historia del tratamiento es compleja, presentándose sucesivamente problemas y soluciones, incluso a la inversa como en la desinfección por productos clorados al demostrarse la formación de trihalometanos que se han relacionado con el cáncer. El tratamiento de aguas tiene características de proceso industrial, por lo que temas como la evaluación de riesgos, entre otros, han pasado a ser también importantes. El 28 de julio de 2010 la Asamblea General de la ONU declaró el derecho esencial a disponer de agua potable segura y limpia.

I.4. NUESTRA AGUA

Globalmente el agua dulce solo representa el 2,5 % del agua total de la Tierra, la mayoría en forma congelada, el resto es salada. En el hombre constituye el 60% del cuerpo, permite el transporte de nutrientes, la respiración, cerebro y nervios. La disponibilidad de agua para toda la población es quizás el más ansiado de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Los datos generales que suelen mencionarse para España son que la mayoría del agua se consume en agricultura/ganadería alrededor del 80%, dejando otro 14% para uso doméstico y 6% industrial. La mayoría del agua captada es superficial, alrededor de un 27% subterránea y el 6% desalada. Los datos del INE de 2020 correspondientes a España indican un suministro anual a las redes públicas de abastecimiento urbano de 4234 hm³ de los cuales 3178 son registrados, dirigiéndose 2291 a hogares y el resto a sectores económicos y municipales. El consumo de agua en hogares es de 0,133 m³/hab.día, y el coste unitario en €/m³ es 1,14 para suministro y 0,78 para saneamiento (total 1,92 €/m³), variando bastante según CCAA, por ejemplo 2,14 en País Vasco y 1,38 en Asturias.

El consumo total de agua depende de la situación económica y también de la población. La población española ha evolucionado entre los años 1900, 2000, 2024 desde 19M a 41M y 48M de personas y se prevé que hasta mediados de siglo crecerá un poco reduciéndose mucho para finales de siglo lo que parece común en otros países occidentales. Regionalmente la evolución de la población ha sido más limitada en el noroeste creciendo más en el mediterráneo y centro.

Este bien tan imprescindible para la vida, el agua, es incolora, inodora e insípida, salvo por las sustancias disueltas o suspendidas en ella. Pueden mencionarse algunas propiedades de interés: que es un magnífico disolvente, con calor específico elevado lo que le convierte en termorregulador, poco compresible debido a los puentes de H₂ que también dan fuerza de adhesión elevada con otras moléculas polares, mal conductor eléctrico, aunque mejora en presencia de sales, siendo importantes sus propiedades de capilaridad, tensión superficial, y reacciones químicas.

I.5. LA PARTICIPACIÓN DEL HOMBRE

La utilización moderna de agua por la población precisa al menos considerar 7 etapas, lo que se denomina el ciclo integral del agua:

- i-*Captación*: Recogida y transporte de agua, en el caso de Asturias esencialmente de embalses como los de Tanes y Rioseco.
- ii-*Tratamiento*: El agua llega a las plantas de potabilización (ETAP) con una composición variable, donde es tratada fundamentalmente para separar partículas y clorar.
- iii-*Almacenamiento*: Para lo cual se dispone de depósitos de almacenamiento elevados.
- iv-*Distribución*: En redes optimizadas con adecuado control de calidad del agua.
- v-*Consumo*: Sobre todo urbano como servicios y doméstico.

vi-*Saneamiento*: Se recoge el agua residual de miles de puntos en una red de alcantarillado que va a depuración.

vii-*Depuración*. Tratamiento de aguas residuales en depuradoras (EDAR) eliminando en lo posible residuos.

viii-*Incorporación* al entorno natural. Sin alterar en lo posible el medio, y en lo posible con reutilización previa por ejemplo para uso en la vía pública o agricultura.

En la Figura 3 se resumen estas corrientes, mostrando la importancia de la recuperación de los materiales separados en los tratamientos, así como la necesidad de la reutilización de las aguas tratadas. Actualmente resulta imprescindible evaluar el proceso de forma global bajo las consideraciones de sostenibilidad que requiere la sociedad.

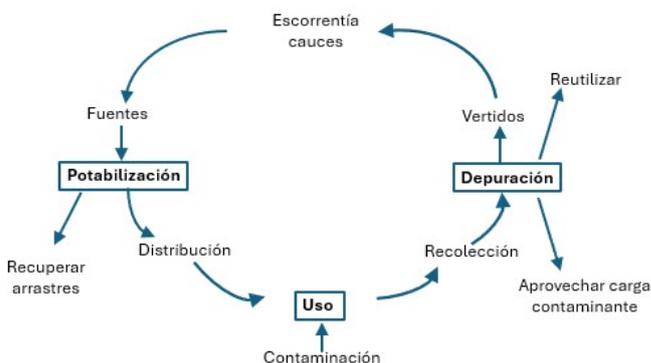


Figura 3. Los procesos generales del agua en la interacción con el hombre

II. CARACTERÍSTICAS Y EVOLUCIÓN DE PROCESOS

II.1. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA

Como se ha indicado en el ciclo integral del agua debemos diferenciar dos tipos de aguas, las que se tratarán para potabilización, y las residuales que se tratarán para su incorporación en el ambiente. La calidad del agua se basa en una serie de parámetros de: contaminación física, orgánica, inorgánica, contaminantes tóxicos y biológicos que se miden con métodos normalizados, y que deben cumplir una normativa legal específica en cada medio. También se han definido unos Índices de Calidad General (ICG) basados en un número limitado de parámetros (por ejemplo, 9) dando unos valores entre 0 y 100 que señalan si la calidad es excelente (por ejemplo, > 90) o inadmisibles (por ejemplo, < 60).

II.1.A. Aguas de abastecimiento a poblaciones

Las aguas captadas tienen una calidad bastante irregular, siendo uno de sus parámetros fundamentales la presencia de partículas en suspensión que cambia con la época del año y las variaciones climáticas. Las exigencias de calidad de agua para uso humano han ido haciéndose más estrictas y actualmente en España está recogida en el BOE-A-2023-628 (R.D. 3/2023) de forma muy completa, algunos datos de indicadores de calidad se muestran en la Tabla 1. El análisis de estos datos requiere ver en detalle la normativa.

Tabla 1. Criterios de calidad aguas de consumo humano (España)

pH	6,5-9,0	Amonio 0,5g/m ³	Cloro comb.residual 2 g/m ³
Turbidez	4,0 unf	Cloruro 250 g/m ³	Cloro libre residual 1 g/m ³
Conductividad	2,5 mS/cm	Sulfato 250 g/m ³	Colonias 22°C..100 ufc/mL
Carbono org. total	5 g/m ³	Sodio 200 g/m ³	Coliformes 0 ufc/mL
Oxidabilidad	5,0 g/m ³	Hierro 0,2 g/m ³	Colifag somát 0 UFP/mL

II.1.B. Aguas residuales

Las aguas residuales urbanas tienen una concentración bastante similar todas ellas en las condiciones de economía occidental, aunque puede haber efectos importantes por la dilución con aguas de lluvia, intrusión marina o la degradación en el alcantarillado. Lo más característico es la presencia de materia orgánica de procedencia humana, con bastante buena biodegradabilidad. Las aguas industriales pueden ser cada una absolutamente diferentes. Se indican en la Tabla 2 una composición promedio de aguas domésticas sin tratar, en g/m³.

Tabla 2. Composición promedio de aguas domésticas sin tratar (g/m³)

Sólidos totales	450	N orgánico	25-85
Sólidos totales disueltos	200	N-NH ₃	15-50
Sólidos volátiles	300	NO ₃ /NO ₂ ⁻	<0,6
Sólidos suspendidos	250	Fósforo total	6-12
Sólidos suspendidos volátiles	200	Fósforo soluble	4-6
DBO	150-200	Bacterias (*No/mL)	10 ⁵ -2x10 ⁶

La concentración de oxígeno varía entre el agotamiento y la concentración de saturación en presencia de aire, a 20°C 0-9,2 g/m³, y es muy importante por dar lugar a procesos anaerobios, anóxicos o aerobios (respectivamente de forma aproximada para valores menores de 1, entre 1 y 2, o mayores de 2 g/m³). La materia orgánica suele medirse por el oxígeno equivalente preciso para su oxidación, en cinco días vía biológica (DBO5) o vía química sobre todo con dicromato potásico (DQO).

II.2. FACTORES EN LA EVOLUCIÓN DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO

Las tecnologías a partir de finales del siglo XIX han ido evolucionando bajo la influencia de factores como, entre otros:

1-*Tamaño de población.* Los procesos de tratamiento siguen siendo muy diferentes para tratamiento de grandes o pequeños caudales, por ejemplo, con el límite de 200 m³/día. Para caudales bajos, con baja tecnología es frecuente la presencia de procesos extensivos basados en la naturaleza, y para caudales elevados predominan los procesos intensivos aerobios. En el primer caso con sólo un proceso, en el segundo con una cadena de ellos.

2-*Normativa legal.* Algunas primeras normativas se basaban en mantener la vida en los ríos, posteriormente por los efectos en la salud, y así se han ido introduciendo límites para macrocontaminantes, sucesivamente compuestos de carbono, de nitrógeno y de fósforo, más recientemente para algunos microcontaminantes y emergentes. La normativa, aunque basada en las tecnologías disponibles, ha ido

empujando también los sucesivos desarrollos tecnológicos y de estructuras empresariales.

3-*Evolución global de la tecnología.* Inicialmente se partía de tecnologías de baja escala, basándose en el transporte e infraestructuras de hormigón. A partir del último tercio del siglo XX se ha generado un mayor conocimiento de procesos, en particular del biológico. Simultáneamente se han ido incorporando desarrollos de la industria de procesos, con conocimientos de fenómenos de transporte y sistemas de control, entre otros.

4-*Situación de la economía.* El valor de la renta per cápita, que también señala zonas geográficas, explica el coste que se aplica en temas ambientales, más allá del necesario suministro de alimentos, la necesidad del agua y la seguridad. La tecnología sigue una evolución relacionada con la economía.

5-*Otros.* Resulta muy importante el papel de los desarrollos legales, los movimientos empresariales, los grupos activistas y políticos, o las relaciones internacionales entre otros. La evolución de los procesos de tratamiento de aguas se debe explicar en el proceso evolutivo simultáneo de los factores presentados.

II.3. IMPACTO DE LA ENERGÍA EN LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO

Los procesos de tratamiento tradicionales involucran fundamentalmente la separación de partículas y la destrucción del resto de compuestos. En la propia naturaleza ambas operaciones se llevan a cabo con baja eficiencia, por lo que precisan un gran volumen o superficie, así como un tiempo largo para llevarlo a cabo. Hace algo más de un siglo los propios ríos eran los sistemas de tratamiento, quedando retenidos los sólidos en zonas de remanso, y requiriéndose kilómetros de cauce para que fuese degradándose biológicamente la materia orgánica. El oxígeno se iba agotando rápidamente y la vida en el río, incluida la pesca, se acababa, forzándose una legislación al respecto. Se precisa así un tratamiento separado en instalaciones específicas, y para llevarlo a cabo es necesario la construcción de infraestructuras, el bombeo y otros requerimientos para llevarlo a cabo. Todo ello requiere un consumo de energía.

El paso de un supuesto tratamiento extensivo a otro programado intensivo, implica menos superficie y mayor consumo de energía. La separación eficaz de partículas introduce operaciones industriales cada vez más eficientes de sedimentación, espesado, flotación, centrifugación o filtración. La separación de partículas y compuestos cada vez más pequeños y con mayor eficacia multiplica las necesidades energéticas.

Para la destrucción de materia orgánica disuelta o en suspensión, el uso de reacciones químicas como la oxidación por permanganato potásico, o el uso de energía para evaporación o temperatura alta no suele resultar factible económicamente para el tratamiento de volúmenes de agua grandes, por lo que la

destrucción de materia orgánica se lleva a cabo con el concurso de transformaciones biológicas. Puede interpretarse que el elevado potencial redox preciso para romper los compuestos orgánicos lo hacen los microorganismos con menor consumo energético a través de múltiples pasos cada uno de un pequeño valor. La relación entre la necesidad de energía y la calidad del agua, y por tanto entre la disponibilidad de agua (utilizable) según la energía disponible es la base del denominado nexo agua/energía, muy tratado en este siglo como tema crítico.

Los procesos más conocidos en la naturaleza, en los ríos, son los anaerobios y los aerobios. Básicamente los primeros generan CO₂ y CH₄, los segundos precisan O₂ y generan CO₂ y H₂O. Al pasar de proceso natural a tecnológico, la necesidad de suministrar grandes cantidades de oxígeno en procesos aerobios promovió que inicialmente los procesos de tratamiento fuesen anaerobios, incluso aprovechando el biogás, como fuente energética en pequeñas localidades. Posteriormente la necesidad de mayores exigencias de calidad y de control de proceso han promovido los procesos aerobios que actualmente pueden constituir cerca del 90% del volumen tratado con un consumo de energía que se hace exponencial para mayores exigencias y nuevos contaminantes.

III. LOS PRIMEROS TRATAMIENTOS. ANAEROBIOS

III.1. LOS PRIMEROS PROCESOS

La descomposición anaerobia de materia orgánica por seres vivos es ubicua en medios naturales. Requiere el acoplamiento de distintas biorreacciones y tiene una baja velocidad debido a las condiciones de T^a y pH no óptimos, a la dificultad de acceso de los nutrientes a las bacterias en situación de baja mezcla, y a la propia baja velocidad de consumo de los microorganismos sobre todo los metanógenos. En las condiciones de los tratamientos más antiguos, sin agitación ni control de temperatura, las mencionadas dificultades suelen requerir bastantes semanas para degradar una cantidad importante de residuos orgánicos en fase sólida.

Este proceso en aldeas o poblaciones hasta más allá del s.XIX se producía en el terreno o en construcciones simples de una forma apenas controlada. El aprovechamiento energético del biogás producido (aproximadamente 21,5 MJ/m³) se planteó principalmente en Oriente habiéndose difundido dos tipos de digestores el chino y el indio. El modelo chino es una estructura cerrada con cámaras de carga y descarga y con un gasómetro adicional. El modelo indio incluye una campana que sube o baja según el gas que se genere haciendo de gasómetro.

El tratamiento de residuos de ganaderías, sobre todo purines, ha recibido atención en Europa en las pasadas décadas en relación con la calidad de vertidos a cauces y a los suelos, y ha resultado muy importante en relación con la implantación de granjas sostenibles. Además, en estos años el tratamiento para aprovechamiento del biogás está recibiendo en Europa un

impulso importante por la capacidad de suministro de energía en un periodo de transición. Aproximadamente se produce al día por vaca 50 kg de estiércol y 75 kg de purín que puede generar respectivamente por kg 0,06 m³ y 0,030 m³ de biogás. Así cada vaca podría generar al día 4,8 m³ biogás, unos 10 kW.h de energía eléctrica. Esto equivaldría a una potencia de unos 0,4 kW por vaca, aunque el proceso de su obtención, transporte, biorreactor y transformaciones consume bastante energía. Por ejemplo, Asturias tiene unas 225000 vacas nodrizas, la producción económica de biogás debe contemplar el transporte de residuos, resultando difícil su aplicación para distancias de más de 40 km. Para el desarrollo de las plantas, resultarán importantes las medidas económicas y fiscales

III.2. LOS SIGUIENTES DESARROLLOS

Los primeros desarrollos se produjeron a principios, y sobre todo a mediados, del siglo XX. Algunas mejoras tuvieron lugar modificando la geometría y separando inicialmente las fracciones sólida y líquida en procesos ya tradicionales. Algunas mejoras adicionales permitían bajar los tiempos de residencia apreciablemente, y tienen que ver con varios aspectos:

- i-*La mejora de la mezcla.* Facilita el acceso de nutrientes a las células, la salida de productos hacia otras bacterias o hacia el exterior. Se propusieron algunas formas de agitación mecánica incluyendo la operación periódica, y sobre todo agitación neumática con el propio biogás producido previa recompresión. Reduce además la heterogeneidad de las concentraciones y la temperatura.
- ii-*Control de la temperatura.* El control de temperatura que se desarrolló previamente para fermentaciones y otras reacciones industriales, permite tener una mayor homogeneidad térmica, mayor velocidad de transformación y estabilidad de la biorreacción.
- iii-*Otras opciones.* En el proceso anaerobio suelen diferenciarse la etapa hidrolítica (con frecuencia limitante), la acidogénica, la acetogénica y la metanógena, cada una con unas exigencias microbiológicas y ambientales diferentes. Por ello separar alguna de esas etapas trabajando en condiciones diferentes en cada una puede resultar favorable, aunque puede ser difícil si al mismo tiempo se impiden procesos simbióticos de interés.

III.3. TRATAMIENTOS TRADICIONALES EN PEQUEÑAS COMUNIDADES

III.3.A. *Para aguas de suministro*

En Asturias, hasta hace unas décadas pervivían en muchas comunidades fuentes de agua potable, que podían incluir zonas posteriores para bebida de animales, para lavadero público y finalmente para otros usos. En zonas mediterráneas se precisaba almacenar el agua de lluvia, siendo muy usuales la presencia de aljibes, infrecuentes en Asturias, e incluso embalses hasta en época de los romanos.

III.3.B. Para aguas residuales

En pequeña escala conviene mencionar las fosas sépticas y los humedales.

i.- Las fosas sépticas.

Son depósitos enterrados, impermeables, que recogen sólidos como fangos sedimentados en el fondo estabilizándose que se recogen periódicamente, así como flotantes, que se evita que salgan con el efluente mediante un deflector (Figura 4). El tiempo de retención hidráulico TRH (volumen/caudal) es al menos de dos días, extrayéndose los gases formados CH_4 , CO_2 , SH_2 ... por chimenea/s. El volumen disponible para el líquido se reduce por la presencia de fangos y por el volumen que se deja sobre el líquido. La forma conviene que sea alargada para reducir los espacios muertos y la profundidad suele ser de alrededor de 1,5 m. Puede realizarse un tratamiento secundario adicional en zanjas de infiltración donde el agua se infiltra a través de un suelo preparado al objeto.

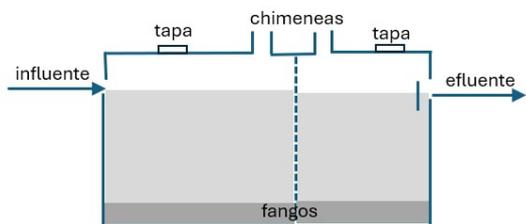


Figura 4. Esquema de fosa séptica

ii.- Los humedales.

Los humedales naturales tienen un papel ecológico importante, los artificiales se usan para tratamiento secundario o terciario en comunidades medianas. Los lechos se impermeabilizan plantándose macrofitos, como el carrizo, que aportan oxígeno a través de las raíces donde los microorganismos degradan materia orgánica disuelta. Se suelen clasificar en los superficiales como el que se indica en la Figura 5, y los de flujo subsuperficial (vertical o horizontal) en los que el agua circula a través de un medio granular por debajo del terreno.

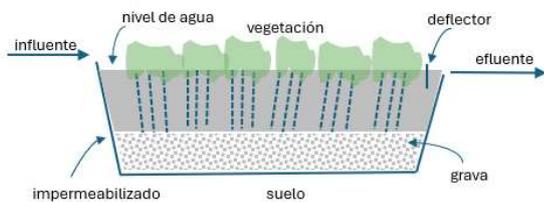


Figura 5. Esquema de humedal de flujo superficial

Los sistemas de flujo vertical se utilizan también para tratar lodos que se van depositando superficialmente, percolando y al mismo tiempo deshidratándose por evapotranspiración. Los lodos se vacían cada 5 o 10 años como producto análogo a lodo compostado. Suele requerirse alrededor de $0,2 \text{ m}^2$ por habitante equivalente, con unos 40 cm de capa granular y 15 cm de resguardo llegando a acumularse 1m de lodos.

III.4. LOS DESARROLLOS ANAEROBIOS MÁS RECIENTES

Los procesos anaerobios han sufrido un buen número de desarrollos propulsados sobre todo por el interés en el aprovechamiento energético. La necesidad de elevados tiempos de residencia cuando la materia orgánica se encuentra como sólido en el entorno de 40 días limitaba su aplicación, pero esto se puede evitar si se tiene un agua residual soluble y fácilmente biodegradable, como ocurre en algunos residuos industriales. En el último tercio del siglo XX se desarrollaron procesos anaerobios para residuos de compuestos orgánicos en disolución, al menos aparente. Con compuestos fácilmente biodegradables podía alcanzarse la operación con tiempos de residencia (TRH o τ) del orden de un día, ya en el entorno de la operación con caudales análogos a los procesos aerobios, aunque la depuración final podía ser algo menor. Se señalaron habitualmente cuatro tipos de biorreactores:

- Filtro biológico*. El agua pasa en el espacio entre soportes recubiertos de biomasa bacteriana, con frecuencia ascendente.
- Lecho fluidizado*. Una elevada velocidad de flujo ascendente del agua hace que los soportes con biomasa pasen a estar fluidizados, moviéndose libremente en el lecho, pero sin ser arrastrados
- Flujo en canales ordenados*. Se dispone un lecho ordenado con canales muy estrechos bien organizados y la biomasa fijada en la estructura,
- UASB*. El agua asciende a través del lecho de biomasa floculenta y sale en el sobrenadante, mientras el biogás se recoge en unas campanas invertidas introducidas en el líquido.

III. 5. LOS TRATAMIENTOS Y LA ENERGÍA PRECISA

En España se suministran al año $3,7 \text{ Gm}^3$ de agua potable y se tratan $4,0 \text{ Gm}^3$ de aguas residuales, consumiéndose unos 4000 GW.h en sus tratamientos. Unos 120kW.h por hogar o el equivalente al consumido al ver la televisión. En las plantas ETAP para obtener agua potable el consumo de energía resulta entre $0,11$ y $0,41 \text{ kWh/m}^3$ En las plantas EDAR el consumo de energía es entre $0,41$ y $0,61 \text{ kWh/m}^3$. La dualidad agua-energía es una forma de señalar que se puede obtener agua con suficiente consumo de energía, claramente en la producción de agua potable a partir de salada por ósmosis inversa.

La reducción del consumo de energía en las plantas de tratamiento es uno de sus retos principales, todavía con campo de mejora, aunque ya se han implementado la Norma ISO 50001 y las auditorías energéticas en muchas plantas. Además, en las plantas de tratamiento se promueve la generación energética en el propio proceso o aprovechando las superficies disponibles, para generar energía solar. En total se producen más de 600 GW.h al año, la mitad por biogás.

IV. EL MOVIMIENTO DE LAS CORRIENTES ACUOSAS

IV.1. TRANSPORTE

Tanto el suministro de agua para consumo, como la recogida de aguas residuales para su tratamiento, lleva consigo tener que disponer de una gran red de conducciones con un coste muy importante de construcción e incluso de mantenimiento. El movimiento en la mayoría de las redes ha sido impulsado por la gravedad, lo que ha requerido construcciones importantes para superar dificultades geográficas.

IV.1.A. *Movimiento por gravedad*

i.- *Suministro.*

El proceso de suministro de agua tiene como se ha comentado, una larga historia con impresionantes ejemplos en España de la época de los romanos como es el acueducto de Segovia, incluso de hace sólo un par de siglos el modesto Acueducto de los Pilares en Oviedo (Figura 6.a).



Figura 6. a. Restos del Acueducto de los Pilares en Oviedo.
b. Interior de un canal con medidor de caudal

ii.- *Alcantarillado.*

La recogida de aguas residuales desde los consumidores hasta las plantas de tratamiento de agua presenta sistemas habituales de alcantarillados y canales, cada vez con mayor control para caudales, y otros parámetros de flujo (Figura 6.b). La red de alcantarillado suele representar un coste de instalación superior a la de proceso, e incluso su mantenimiento similar al mismo. Lo más habitual en España siguen siendo redes unitarias (mezclando las pluviales) aunque se promueve las separativas (de residuales y pluviales). La recogida de aguas pluviales en el nivel factible técnicamente es interesante en muchas situaciones, planteándose así tanques de pluviales con un volumen que debe establecerse a partir de series históricas.

Los materiales de esta enorme infraestructura con longitud similar a las calles urbanizadas suelen ser hormigón, fibrocemento, o plásticos como polietileno de alta densidad o PVC, con vida útil por ejemplo 100 años para hormigón o 50 para plásticos. Los posibles problemas debido a errores de construcción, corrosión, accidentes etc, conducen a costes en la operación que

pueden ser muy variables. Hay normas (por ejemplo, UNE1916/2008) para el diseño, así como la forma de colocación según los tipos de material y el suelo. Debe además recordarse la necesidad de disponer de numerosos pozos de registro, acometidas, registros y estaciones de bombeo, habitualmente situados cada unos 50m. La ecoeficiencia (ISO 14045/2012) pretende evaluar la combinación del valor del sistema y el impacto ambiental.

Con redes de alcantarillado de varios centenares de kilómetros recubiertas de biopelículas, se puede entender que se comporten como biorreactores produciéndose gases como CH₄, SH₂ además de otros como N₂O. Su magnitud depende de muchas variables como la T^a, O₂, biopelículas, zona mojada, material constructivo, o el tiempo de residencia. Con O₂>0,5 g/m³ se inhibe la formación de SH₂, y la presencia de NO₃⁻, NO₂⁻ inhibe la formación de CH₄ y SH₂. La formación de N₂O depende de la relación de sustratos C/N, la intensidad de carga, las especies de N y los microorganismos productores.

La velocidad del agua que desciende en los canales es proporcional a la potencia 1/2 de la pendiente, la 2/3 del radio hidráulico (superficie/perímetro mojado) y la inversa de la rugosidad según la ecuación de Manning. El caudal se calcula multiplicando esa velocidad por la sección del agua descendiendo, para lo que se precisa conocer la altura del agua en el caudal (Figura 6.b). En las redes de alcantarillado se debe considerar también el consumo de energía debido a las estaciones de bombeo. En la entrada de las plantas de tratamiento de aguas residuales se colocan con frecuencia **tanques de tormenta**, para recoger las primeras aguas de lluvia que arrastran la suciedad de las calles y que pueden llegar a tener más contaminación que las fecales

IV.1.B. *Movimiento por bombeo*

Desde hace un par de siglos la opción de bombeo y el uso de tuberías se aplica de forma complementaria, cuando no basta con aprovechar la dirección de la gravedad, precisándose colocar bombas. La energía de bombeo necesaria (m²/s²) que se calcula mediante la ecuación de Bernoulli, debe multiplicarse por el caudal másico para obtener la potencia de bombeo teórica necesaria (W). Con frecuencia debe considerarse que los altos caudales involucrados pueden multiplicar excesivamente los costes energéticos. Otro proceso, el de mezcla es también muy importante en las operaciones y gestión del agua.

IV.2. LA IMPORTANCIA DE LAS CUENCAS

Las cuencas hidrográficas son un territorio con un sistema de drenaje natural, al mar o a un lago, embalse o agua subterránea. Los recursos hídricos dependen de la edad del año, la lluvia, infiltración, reutilización, desalación o acuíferos. La calidad depende de las actividades humanas, agrícolas, industriales o mineras, de las plantas de tratamiento, y muchas otras variables como deforestación o erosión. Conseguir la disponibilidad de agua para todos los usos considerados debe ser afrontado por la

administración mediante una gestión integrada de la cuenca. Resulta así muy importante la problemática en la **gestión de las cuencas** y la consecuente distribución del agua. Primero en las pequeñas comunidades y posteriormente a las grandes cuencas de los ríos. Los trasvases entre cuencas excedentarias y deficitarias resultan interesantes en ocasiones, aunque siempre se generan polémicas sobre la clasificación de excedentario y los impactos ecológicos.

Hay una gran complejidad en la previsión de la gestión por: a) el número de participantes, desde entidades hasta personas individuales; b) las numerosas escalas temporales que se deben cubrir, desde minutos/horas (por ejemplo, colapso de alcantarillado), días (variación de consumos...), meses (mejora de colectores o plantas), años (construcción de infraestructuras, acuíferos o cambios culturales); c) la elevada incertidumbre (consumo, régimen de lluvias); d) la necesidad de sostenibilidad ecológica, social y económica.

Algunos problemas habituales son los vertidos no saneados, los excedentes de nitrógeno y la presencia de especies invasoras, la pérdida de hábitats, la alteración del régimen de caudales por embalses o la eutrofización. Se han usado herramientas como la huella hídrica, y el análisis del ciclo de vida (ACV), habiéndose mostrado como principales categorías de impacto el cambio climático, el agotamiento de recursos, la toxicidad, y la eutrofización.

V. PREPARACIÓN DE AGUA. TRATAMIENTOS FÍSICOS

Las aguas de suministro requieren casi únicamente un tratamiento físico para la retención de sólidos dado que tienen una concentración baja de materia orgánica, es la potabilización. Las aguas residuales requieren inicialmente un proceso análogo de separación de materiales sólidos que se verá en este Apartado V.2. Pero dichas aguas residuales contienen también una concentración elevada de materia orgánica cuyo tratamiento se describirá posteriormente en el Apartado VI.

V.1. POTABILIZACIÓN

V.1.A. Procesos

La disposición de agua para consumo ha tenido una preferencia entendible, respecto al tratamiento de residuales. Disponer de agua potable ha conducido a la eliminación práctica de muchas enfermedades ya a partir de finales del siglo XIX, esencialmente con la eliminación de partículas y la desinfección final. Aunque también se realiza esta operación en pequeños volúmenes por consumidores individuales, el tratamiento global se realiza en grandes instalaciones ETAP (estaciones de tratamiento de agua potable, que diferenciaremos para aguas superficiales o subterráneas (a), y otras (b).

a) Aguas de suministro superficiales o subterráneas

Podemos considerar varias etapas:

i.- Captación del agua.

La primera etapa es disponer del agua. La de origen subterránea habitualmente tiene baja turbidez y buena calidad, aunque puede tener Fe y Mg. La superficial captada directamente de ríos, o a partir de lagos y sobre todo embalses, suele presentar turbidez, O_2 , y costes de tratamiento más elevados. Otra fuente de agua es la del mar mediante su desalinización, como se verá en el apartado b.

ii.- Coagulación.

Una vez el agua ha sido transportada a la instalación, puede haber un desbaste ($>1\text{mm}$) mediante rejillas, desarenado e incluso una precloración para reducir el crecimiento de algas en la planta. Para facilitar la eliminación de partículas más pequeñas suele requerirse su agregación, habitualmente mediante el uso de coagulantes. Estos neutralizan la carga superficial negativa de los coloides añadiendo cationes polivalentes como Fe^{3+} o Al^{3+} frecuentemente sulfato o policloruro de aluminio, sometidos a agitación breve e intensa. A continuación, se promueve la floculación mezclando y facilitando la colisión para que se unan las partículas estabilizadas formando flóculos, con agitación suave y tiempos cercanos a la media hora. La reducción de las partículas por unidad de tiempo suele hacerse proporcional a su número y a la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$, s^{-1}). El aumento de la dosis de coagulante conduce a una reducción de la turbidez residual al reducirse la carga superficial hasta una dosis óptima, pero si se continúa añadiendo, se invierte la carga y aumenta la turbidez al reducirse los flóculos. La adición de polielectrolitos, naturales o sintéticos puede mejorar el proceso seleccionándose su concentración, una vez elegida la dosis óptima de coagulante.

iii.- Decantación.

Formados los flóculos se separan por gravedad en decantadores, con frecuencia rectangulares. En general las plantas de tratamiento precisan bastante superficie, por lo que habitualmente debe considerarse su adaptación al terreno disponible. El agua sale por un aliviadero superior tras fluir por debajo de una placa, mientras el lodo es arrastrado en el fondo por unas rasquetas hasta un pozo de donde se extrae con una bomba. La superficie del decantador debe permitir que la velocidad del agua no sea superior a 40 m/día, siendo la altura de unos 3 m con pendiente en la base aproximada del 2%.

La OMS señala que el agua potable debe tener menos de 5 UNT unidades nefelométricas de turbidez, por lo que a continuación debe filtrarse por gravedad en medio granular, con una o varias capas de arena silícea o carbón activo.

iv.- Filtración.

Para retener los flóculos que no hayan decantado, el agua se distribuye mediante aliviaderos con placas deflectoras, tradicionalmente en los denominados filtros lentos, sobre un medio granular de 1m aproximado de profundidad de arena silícea ($D_p=1-2\text{mm}$). La velocidad de filtración (caudal/sección) suele ser de 200-300 m/día que puede ir disminuyendo hasta

5-10 m/día al cabo de uno o dos meses en que se dreña y limpia la biopelícula formada, que ayudaba como tamiz. En las plantas grandes se usan los **filtros rápidos**, que pueden llevar otra capa de carbón activado además de la de arena, manteniendo una velocidad de unos 200 m/día, limpiando cada unos dos días de forma automática, primero con aire a contracorriente para expandir el lecho liberando los sólidos y después con agua también a contracorriente para arrastrarlos y recogerlos en los canales de salida. En ocasiones la adsorción con carbón activado se lleva a cabo posteriormente por separado con el objetivo de retener bacterias, virus y algunos compuestos.

v.- **Desinfección.**

Al final se coloca una etapa de desinfección para eliminar patógenos como virus o bacterias y otros contaminantes que persistan. Suelen ser oxidantes, fundamentalmente hipocloroso/hipoclorito (según el pH) y otros derivados de cloro. Primeramente, se oxidan Fe(II), Mn(II) o SH₂ de forma muy rápida, pero al seguir añadiendo los compuestos de cloro reacciona con amoníaco y materia orgánica dando compuestos organoclorados como cloraminas (algo desinfectante y lento), que a su vez se oxidan al seguir añadiendo cloro hasta un punto denominado de ruptura. La cantidad adicional que se añade queda como cloro libre residual, típicamente entre 0,5 y 1,5 g/m³, para inactivar patógenos que pueden incorporarse antes de llegar el agua al consumidor. Otras opciones utilizadas como desinfectante son el uso de ozono, o reacciones como luz ultravioleta y nuevas propuestas como el ácido peracético.

b) **Otras aguas de suministro**

b.1. **Agua salina o agua de mar. Desmineralización.**

En España, en particular en el mediterráneo y las islas, hay unas 800 plantas que si se usara sólo para consumo humano tienen capacidad para abastecer a unos 34 millones de personas (5×10⁶ m³/día).

La **ósmosis inversa** es la operación principal. Antes debe aplicarse un pretratamiento para eliminar la turbidez, los microorganismos y reducir el crecimiento de algas. Se suele colocar también una desinfección, coagulación y control de pH (H₂SO₄) seguido de la filtración sobre arena. Puede requerirse también la adición de dispersante, ácido y bisulfito previo a la filtración en cartuchos y antes de introducir en la ósmosis.

En la propia ósmosis el mayor coste es el energético debido al bombeo, unos 3 kWh por m³ de agua producida. Primero las bombas de baja presión a la planta, después las de alta presión para subir la presión por encima de la presión osmótica, requiriéndose alrededor de 6,5-7 MPa con las membranas actuales, que quizás se pueda reducir algo en el futuro. Ello hace que el agua dulce pase desde la solución salina a través de la membrana semipermeable hacia la solución de agua dulce. La recuperación de energía se realiza con la corriente de salmuera, que mantiene casi la presión mencionada, mediante cámaras de intercambio de presión, “transfiriendo esa presión” al agua de

entrada del mar. El coste según AEDyR en España es alrededor de 0,6-1,0 €/m³. Antes de introducirla en la red, el agua se remineraliza al nivel deseado, se eleva el pH y reduce el CO₂.

b.2. **Otros procesos de desmineralización.**

Existen muchas otras situaciones en ámbitos locales.

-Una de ellas es el **ablandamiento** de aguas duras (>100g/m³ de CaCO₃(dis)), que suelen ser subterráneas de suelos calcáreos en que aumentan las cantidades de Ca/Mg, y también de zonas costeras.

La forma más habitual de tratamiento es por intercambio iónico cambiando los iones mencionados por Na y K. Otra forma es la precipitación de CaCO₃ añadiendo CaO, o llevando a ebullición.

-Otro ejemplo es la **eliminación de Fe-Mn** de aguas subterráneas. Para ello puede colocarse inicialmente la oxidación mediante aeración seguida de filtración, y a continuación puede introducirse O₃ y NH₂Cl.

Existen otras situaciones de interés como la eliminación de fluoruros en algunos lugares geográficos y zonas industriales.

V.1.B. **Equipos.**

El esquema general de la operación de una planta ETAP se muestra en la Figura 7.

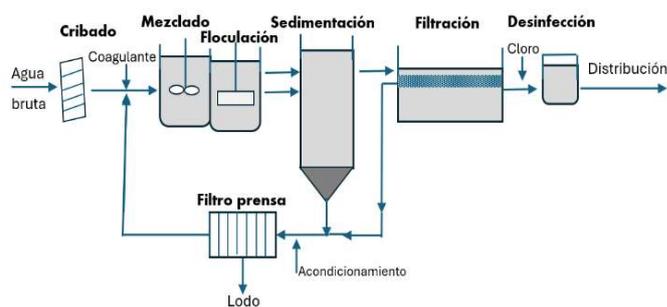


Figura 7. Esquema general de una planta ETAP

Siguiendo este esquema, se muestran algunas fotografías de captaciones de agua (Figura 8) y de plantas de tratamiento (Figura 9).

i.- **Captación.**



Figura 8.a. Captación de aguas; del río Narcea y el embalse de Tanes



Figura 8.b. Estación ETAP Ablaneda y arqueta

ii.- *Pretratamiento.*

En una primera etapa suelen colocarse rejas de desbaste y tamizado (Figura 9).

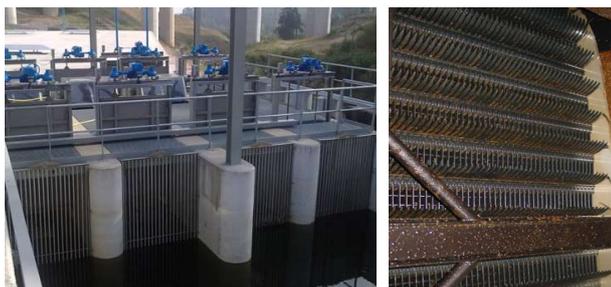


Figura 9. Rejas de desbaste y Tamiz

iii.- *Separación de partículas.*

Se coloca una etapa de coagulación, seguida de la decantación y filtración de arena, indicándose una representación de estas últimas en la Figura 10.



Figura 10. Decantador y separación en lecho de filtración (desarenado)

iv.- *Desinfección.*

Junto con la cloración, los otros dos sistemas más usados son los ozonizadores y la radiación ultravioleta, que se muestran en la Figura 11.



Figura 11. Cloración. Luz Ultravioleta. Ozonización

v.- *Tratamiento de lodos.*

La primera etapa del tratamiento de los lodos es el espesado en un equipo como el que se señala en la Figura 12.

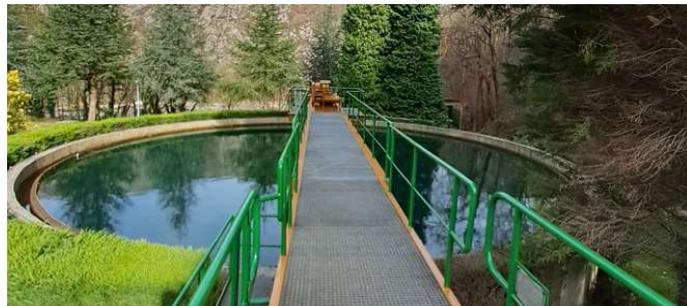


Figura 12. Espesador de lodos en ETAP

Después de un depósito de homogeneización suele colocarse un filtro prensa, previa adición de un polielectrolito y sobre todo de cal que se almacena en silos colocados en altura, fáciles de identificar exteriormente, en los distintos tipos de plantas.

V.1.C. *Residuo de la ETAP*

a) En las plantas que tratan **aguas superficiales** se recogen en los fangos un volumen de alrededor del 0,5% del agua tratada, según el grado de concentración realizada, consistiendo en los reactivos utilizados en el tratamiento, sobre todo sulfato de aluminio (se usa más que el cloruro férrico), ácido sulfúrico, cal y polielectrolitos, así como los productos inertes y contaminantes que trae el agua bruta. En particular se tienen carbonatos e hidróxidos con un pequeño porcentaje de materia orgánica. Se puede llegar a obtener una torta con porcentaje de sólidos del 20% en centrifuga, 30% en filtro a vacío o 45% en filtro prensa. Las aguas de lavado se suelen reaprovechar. El aprovechamiento del sulfato de aluminio puede tener opciones comerciales.

b) En las **plantas de ósmosis inversa** usadas para suministrar agua potable a partir de agua de mar, por cada 100 m³ tratados, además de 45 de agua dulce se generan 55 de salmuera, que además de una concentración salina más elevada puede tener diferente pH y temperatura, así como antiexpumantes, antiincrustantes, biocidas y otros productos químicos. Aunque este efluente se diluye aproximadamente una parte con unas tres partes de agua marina, antes de introducirlo en el mar a través de dispersores como emisarios submarinos, que si no se gestiona apropiadamente la zona de vertido podría generar un efecto importante en las praderas marítimas (*Posidonia oceánica*) afectando a su crecimiento y muerte.

V.1.D. *Equipos auxiliares*

Son importantes numerosos equipos eléctricos, de bombeo, tuberías y de control de proceso. Por señalar alguno, en la Figura 13 se muestra parte del sistema de bombeo de lodos



Figura 13. Bombas y manejo de lodos

V.2. AGUAS RESIDUALES. PRETRATAMIENTO Y TRATAMIENTOS PRIMARIOS

V.2.A. Procesos

Las aguas residuales que llegan a la planta EDAR son sometidas inicialmente a procesos físicos de separación de sólidos, de partículas, con cierta analogía a la señalada en el tratamiento de ETAP. En las aguas residuales debido al contenido elevado de materia orgánica disuelta o coloidal este debe ser tratado a continuación como se indica en el Apartado VI mostrándose el tratamiento global en la Figura 31. La parte inicial se trata aquí.

La llegada del agua residual a la planta de tratamiento en un canal suele encontrarse con un tornillo de Arquímedes que puede hacer un corte previo en la corriente, así como ganar altura facilitando su tratamiento posterior por gravedad. A continuación tenemos:

i.- Desbaste o Cribado.

Se pretende la separación de sólidos flotantes o en suspensión que podrían ocasionar obstrucciones aguas abajo, como papel, plásticos, vegetales, piedras, etc., mediante rejas o tamices. De forma orientativa el desbaste se suele clasificar según el paso libre entre rejas, grueso para más de 4 cm, fino entre 6 y 10 mm, e intermedio entre ambos. Las **rejas** son barras horizontales con determinado espaciado, que suelen clasificarse según que la limpieza se haga de forma manual o automática. Los **tamices** suelen colocarse después de las rejas, habitualmente estáticos o rotatorios. En los **estáticos** el agua se desliza sobre una malla filtrante, quedando retenidos los sólidos que van cayendo por gravedad y se recogen. En los **rotatorios**, un tambor con orificios que gira, arrastra las partículas retenidas hasta el punto de descarga donde se retiran mediante tornillo o cinta transportadora.

ii.- Desarenado.

Se procura eliminar las partículas como arenas, gravilla, cristales rotos, etc, con altas velocidades de sedimentación, mayor que las de las partículas orgánicas. Así se evitan sedimentos posteriores, abrasión o protección de bombas, y al mismo tiempo se separan los materiales inorgánicos de los orgánicos. Trabajando en flujo laminar sedimentarán las

partículas cuya velocidad terminal sea mayor que la ascensional del agua. Son frecuentes los decantadores horizontales, los vortex (promoviendo una fuerza centrífuga), y los aireados que suelen ser los más usados en España. En estos últimos la inyección de aire genera un movimiento que permite la sedimentación de las arenas, mientras las partículas orgánicas son arrastradas, al tiempo que se favorece la ruptura de las emulsiones agua/aceite pudiendo recuperarse estas últimas en rasquetas de superficie.

iii.- Floculación / Sedimentación-Flotación.

Las operaciones siguientes, sedimentación o flotación van precedidas en algunas EDAR por la promoción del aumento del tamaño efectivo mediante coagulación y floculación. Este efecto ha sido tratado en el apartado V.1.A así como la sedimentación, mientras la flotación, que compite con la sedimentación se describe en el apartado VII.2.A.

V.2.B. Equipos

Una representación de dos equipos iniciales como el tornillo de Arquímedes y una reja de gruesos se indica en la Figura 14. En la Figura 15 se muestran dos equipos de pretratamiento, cribado y desarenado, frecuentes en plantas EDAR.



Figura 14. Tornillo de Arquímedes y reja de gruesos



Figura 15. Cribado y desarenado

VI. ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA. TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS

La materia orgánica presente en las aguas residuales que no se ha separado en el pretratamiento se encuentra en forma disuelta, coloidal o en tamaño inferior de unas pocas micras. Su eliminación se ha realizado en algunos momentos por oxidación química, para muy bajas concentraciones de materia orgánica,

para caudales bajos y sobre todo variables. Se ha utilizado así permanganato, dicromato, e hipoclorito, Actualmente la eliminación de materia orgánica se suele realizar de forma más económica por transformaciones biológicas, en biorreactores, lo que también se denomina tratamientos secundarios. En VI.7 se verán algunos tratamientos no biológicos.

VI.1. TRANSFORMACIONES BIOLÓGICAS

VI.1.A. Mecanismos

i.- Aerobios.

La transformación de la materia orgánica consiste en su transformación sucesiva en moléculas más pequeñas, primero mediante hidrólisis, y después en CO₂ y H₂O en procesos aerobios, y en CO₂ y CH₄ en anaerobios, al tiempo que crecen los microorganismos. La primera etapa de hidrólisis es con frecuencia la limitante. La oxidación se produce a través de compuestos intermedios en pequeños pasos, con la participación de ATP que se transforma en ADP mediante reacción exotérmica de unos 30 kJ/mol, y donde las enzimas disminuyen las energías de activación aumentando la velocidad de transformación, que se ajusta de forma básica a la concentración de sustratos limitantes según la ecuación de Michaelis-Menten. En la Figura 16 se muestran diagramas básicos para varios componentes, que comienzan con sus hidrólisis. Los carbohidratos entran en ciclos bioquímicos incluyendo la respiración, las proteínas se rompen en aminoácidos pudiendo separarse amoníaco o CO₂, y las grasas con lipasas se transforman en carbohidratos y ácidos grasos que se rompen por β-oxidación.

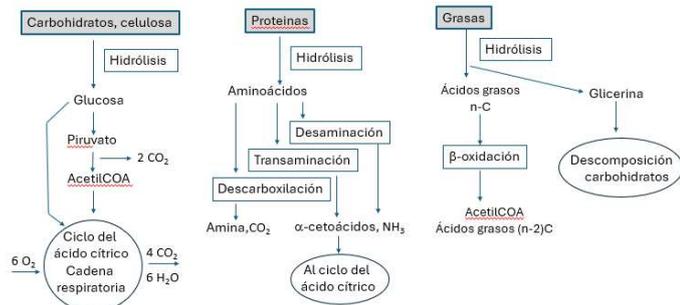


Figura 16. Esquema básico de degradación aerobia de carbohidratos, proteínas y grasas

Los productos de base biológica podrán descomponerse rápidamente si existen las enzimas necesarias en suficiente concentración, aunque pueda haber un tiempo de retardo para que se formen las enzimas en periodos de puesta en marcha. Para los compuestos parcialmente biodegradables, las enzimas específicas están en concentraciones muy bajas por lo que debe procurarse una estrategia para el desarrollo de los microorganismos adecuados. También suele haber condiciones óptimas para cada tipo de sustratos. Con algunos productos xenobióticos puede que no se tenga el sistema enzimático, no consumiéndose oxígeno para degradación biológica, dando valor cero de DBO y valores considerables de DQO Para

tratarlos biológicamente debieran buscarse microorganismos modificados genéticamente, situación poco habitual.

ii.- Anaerobios.

La degradación anaerobia con microorganismos mezclados es habitual en la naturaleza, generando biomasa con un residuo poc putrescible, y produciendo un biogás con aproximadamente 55-70% de CH₄, 30-45% de CO₂ en base seca, junto con otros componentes como SH₂ (0,02-0,4%), y con una potencia energética de unos 20-25x10³ kJ/m³. Esta transformación se produce en forma resumida como se indica en la Figura 17.

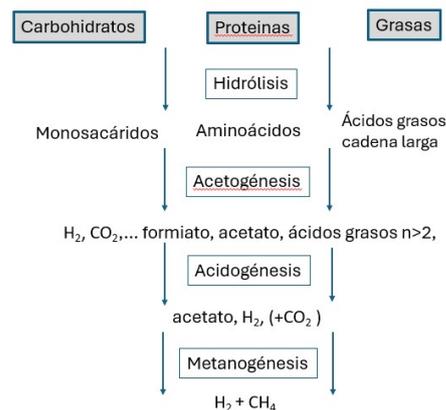


Figura 17. Esquema básico de degradación anaerobia de carbohidratos, proteínas y grasas

iii.- Otras transformaciones.

Existen vertidos, sobre todo industriales con otros componentes que pueden aceptar electrones si están ausentes O₂ y NO₃⁻. Quizás el siguiente compuesto en importancia es el ión sulfato que se convierte en SH₂ mediante bacterias sulfato reductoras (BSR) como *Desulfovibrio*, o *Desulfobulbus*. Simultáneamente a su transformación se precisa estudiar la operación de las bacterias productoras de metano (BPM). La relación DQO/sulfato define la preponderancia de una u otra; de forma que si es menor de 2/3 desaparece la metanogénica. La operación precisa evidentemente dadores de electrones, que pueden ser algunos compuestos simples como acetato, o materiales residuales como melazas o lácteos.

VI.1.B. Estructuras físicas en el proceso de transformación

i.- Flóculos.

La biodegradación de la materia orgánica se realiza sobre todo por bacterias. La cantidad de bacterias suele relacionarse con la cantidad de los sólidos suspendidos volátiles SSV (los que se queman al pasar de 100 °C a 540°C), El tamaño de las bacterias es del orden de una micra, su muerte genera exopolisacáridos, junto a otros materiales, que hacen de puente entre las bacterias y otras materias orgánicas e inorgánicas dando lugar a agrupaciones, flóculos en suspensión, de un tamaño que se suelen señalar entre 0,1 y 2 mm (Figura 18).

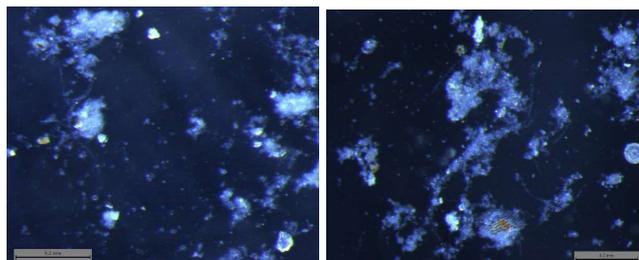


Figura 18. Morfología de diferentes tipos de flóculos de lodos de aguas residuales urbanas (estereomicroscopio)

Para que tenga lugar la transformación deben llegar los sustratos a los microorganismos dentro del flóculo. En el caso del oxígeno como aceptor de electrones, debe hacer un “viaje” cayendo la concentración (---) desde el interior de la burbuja de aire hasta el líquido y después en el exterior e interior del flóculo. (Figura 19). Los sustratos solubles deben superar sólo las resistencias en el flóculo. Una vez que se difunden los sustratos al flóculo, donde se adsorbe y transforma, se produce la resorción de moléculas pequeñas al interior de la bacteria, donde tiene lugar la etapa metabólica en que se transforma en energía y una fracción (máscica $Y_{X/S}$) en células.

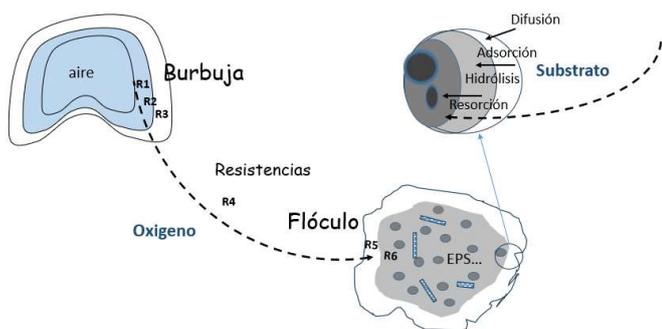


Figura 19. Mecanismos de acceso de oxígeno y de otros sustratos al flóculo y después al interior de la célula

ii.- *Biopelículas.*

Además de la agrupación de bacterias en flóculos suspendidos, en presencia de superficies los microorganismos se adhieren a esas superficies en algún grado, formando biopelículas junto con sustancias poliméricas extracelulares. La formación de biopelículas, que contienen alrededor del 70% de agua, es un proceso complejo que depende del medio, la superficie y los propios microorganismos. La compleja composición de la biomasa puede ilustrarse por la presencia de polisacáridos extracelulares, proteínas globulares y lineales, ácidos nucleicos, enzimas, glicoproteínas, anfífilos, vesículas membranares, fagos filamentosos, entre otros.

El conocimiento de la composición, a veces señalado globalmente como EPS, es importante para la recuperación de recursos y la economía circular.

En el proceso de formación de biopelículas se pasa por varias etapas con muchas interacciones mutuas (Figura 20):

- (i) las células libres (planctónicas) contactan la superficie donde se *adsorben*.
- (ii) se produce la *adhesión* o colonización en la superficie en monocapa,
- (iii) se produce el *desarrollo* de microcolonias
- (iv) tiene lugar la *maduración* en macrocolonias, y finalmente
- (v) se produce la *dispersión*.

El proceso es dinámico con procesos de liberación al tiempo que fijación, dependiendo del tipo de superficie y su rugosidad, así como de la velocidad de deformación producida por la agitación. En las biopelículas el proceso de penetración de oxígeno y otros sustratos es análogo al señalado con flóculos, aunque las biopelículas pueden tener un espesor promedio superior. Por supuesto en situaciones reales podemos tener participación de flóculos y biopelículas, con preponderancia de uno u otro.

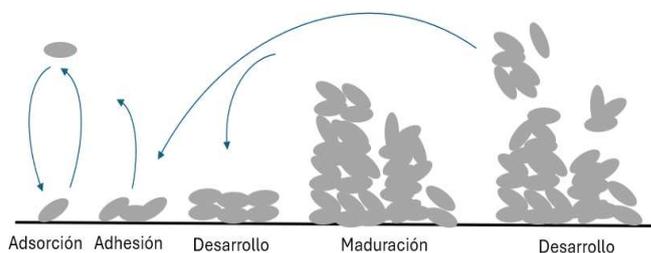


Figura 20. Esquema del proceso de formación de biopelículas en una superficie

VI.1.C. *Estequiometría*

En una reacción química la estequiometría define unos índices estequiométricos, que se colocan delante de los compuestos, y que indican por cada determinado número de moles de uno de ellos cuantos se consumen o producen de otros. Es fundamental pues para cualquier cálculo. Si expresamos la composición celular como $CH_aO_bN_d$ y expresamos la reacción como $C_aH_bO_cN_d + xO_2 + yH_cO_fN_g \rightarrow zCH_\alpha O_\beta N_\delta + uC_hH_iO_jN_k + vCO_2 + wH_2O$, el cálculo de esos índices x, y, z, u, v, w puede realizarse por balances de elementos, y por el método de semipilas redox. Podemos considerar la donación de 1 electrón (e^-), por heterótrofos o por autótrofos, a ser compensado por la aceptación de 1 e^- .

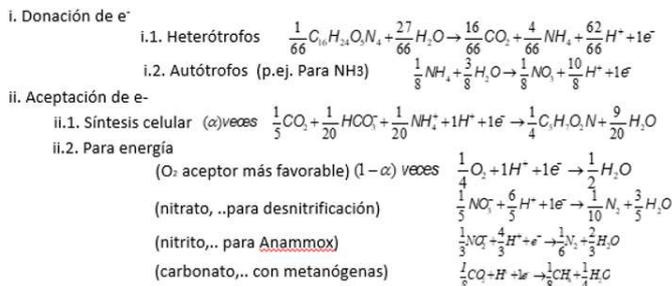


Figura 21. Elaboración de la estequiometría para procesos biológicos de tratamiento de aguas

Si denominamos a α la fracción que se utiliza para síntesis celular, podemos considerar que el resto ($1-\alpha$) se dedica a la generación de energía (Figura 21). Los compuestos más habituales en tratamiento de aguas que pueden aceptar e^- , en orden desde los más favorables a los menos, que sólo funcionan cuando están ausentes (apreciablemente) los anteriores, son:

- i/ El oxígeno es el más eficaz generando gran cantidad de energía, habitual para la eliminación de *materia carbonada* o para nitrificación. Tiene la dificultad de su baja solubilidad en agua.
- ii/ El nitrato funciona como tal si hay escasez de O_2 , pasando a N_2 , en la operación de *desnitrificación*.
- iii/ El nitrito en particular en la operación de *Anammox* con NH_3 como donador de e^- .
- iv/ El CO_2 en ausencia de oxidantes en *procesos anaerobios* para dar lugar metano. También el *ácido acético* entre otros
- v/ Otros compuestos que son consumidos por microorganismos, en particular en mayor concentración en aguas industriales o muy específicas, como el sulfato.

Sumando una de las transformaciones de donación a las de aceptación (una de síntesis celular multiplicada por una fracción α , y otra de producción de energía multiplicada por $(1-\alpha)$) que suma también $1e^-$, se obtiene la estequiometría global de la transformación señalando los diversos tipos de proceso que se pueden presentar.

La fracción α que se dedica a crecimiento celular es muy importante porque nos dirá la cantidad de células que se forma y por tanto los lodos producidos, y si se pasa de moles a masas, tendremos $Y_{X/S}$, los kg de lodo seco que se forma por kg de materia orgánica consumida, medido por ejemplo como DQO. Esa fracción es función de muchas variables, temperatura, cantidad y biodegradabilidad de dicha DQO, presencia de O_2 (menores en su ausencia). Esta fracción suele disminuir hasta cierto límite al aumentar la edad celular de las bacterias, o *tiempo de retención de sólidos* en el interior del biorreactor que es la masa de células en el biorreactor/purga de células por día.

VI.1.D. Velocidad de transformación (cinética)

La velocidad de crecimiento celular $r_X (=)gX/m^3s$, se suele expresar en la zona de crecimiento exponencial como $r_X = \mu X$ donde X es la concentración de microorganismos. El valor de la constante de crecimiento μ puede depender de la concentración de determinado sustrato S que se haya definido como limitante. En ausencia de inhibidores o tóxicos el valor μ se suele ajustar en función de la concentración de S mediante la ecuación de Monod ($\mu = \mu_m S / (K_S + S)$).

Por ejemplo, considerando como S el valor de DQO, y sólo para dar la idea de que en la práctica el diseño se basa en muchos *datos experimentales*, se indican algunos valores habituales $\mu_m = 0,03 - 0,12h^{-1}$, $K_S = 6 - 60gDQO/m^3$ y la fracción de sustrato que se convierte en células, $Y_{X/S} = 0,3kgX/kgS$. En realidad, μ puede depender de dos o más componentes por ejemplo de oxígeno y nitrógeno, debiendo incorporarse en esa ecuación la dependencia de cada uno. La elaboración de

modelos para diseño requiere disponer de multitud de datos cinéticos.

VI.2. ELIMINACIÓN DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES

Las transformaciones biológicas dependen de un gran número de variables, la temperatura, el pH, concentraciones y otros factores como tóxicos, sales etc. Su conocimiento precisa analizar **otros fenómenos**, para resolver después todo el conjunto de ecuaciones. Entre ellos se incluyen

- La concentración de H^+ (pH) equilibrio y disociación, sistemas buffer
- Los equilibrios entre fases: con fase gas (ley de Henry) con fase sólida (producto de solubilidad),
- Complejación y especiación (formación de complejos, constantes de equilibrio),
- Potenciales de semirreacción, procesos redox
- Otros fenómenos, hidrólisis y procesos enzimáticos.

Se señalan a continuación los procesos biológicos más representativos.

VI.2.A. Eliminación de materia carbonada

Dada la complejidad de las reacciones, es frecuente estudiar la transformación en términos de componentes de carbono (DQO, o DBO), nitrógeno y fósforo. Históricamente el hincapié en su eliminación se hizo fundamentalmente en los años 50, 70 y 90 del siglo pasado respectivamente. La medida de la cantidad de C para el diseño de EDAR se ha hecho tradicionalmente por la cantidad de "oxígeno" para su oxidación química DQO, dada su biodegradabilidad, aunque para aguas industriales debe considerarse su DBO.

En los años 90 del siglo pasado se introdujeron experimentos definidos para distinguir tipos de DQO: la soluble (inmediato hidrolizable, rápido hidrolizable, inerte y otros) y la insoluble (lento hidrolizable, inerte, microorganismos). La biomasa se ha solido relacionar con los sólidos solubles volátiles SSV, pero en estos años se ha dividido en diversas fracciones, no por especies, si no por la actividad que realizan globalmente, heterótrofos (desnitrificantes y no) autótrofos nitrificantes y otros. Esta mayor caracterización de materia carbonada y población microbiana se utiliza en la elaboración de modelos.

VI.2.B. Eliminación de materia nitrogenada

La fracción nitrogenada en aguas se mide y expresa como NTK (nitrógeno total Kjeldahl) que mide el nitrógeno orgánico y NH_3 , quedando excluidos del nitrógeno total el NO_3^- y NO_2^- que suelen medirse por métodos colorimétricos. A la entrada de la EDAR amoníaco y urea constituyen alrededor del 75% del nitrógeno total, alrededor de $40 g/m^3$ (como N). Así las aguas residuales deben tratarse para evitar que su vertido pueda producir la eutrofización del cauce y la toxicidad por NH_3 . También se requiere tratar en igual forma diversas corrientes como los sobrenadantes de digestores o rechazos de membranas. Aunque el tratamiento de corrientes muy concentradas como las de ganadería pueden tratarse parcialmente por métodos no

biológicos, como la desorción, el proceso estándar para la oxidación de NH_3 es la oxidación autotrófica, aunque se ha propuesto también la oxidación heterotrófica que presenta velocidades mas pequeñas.

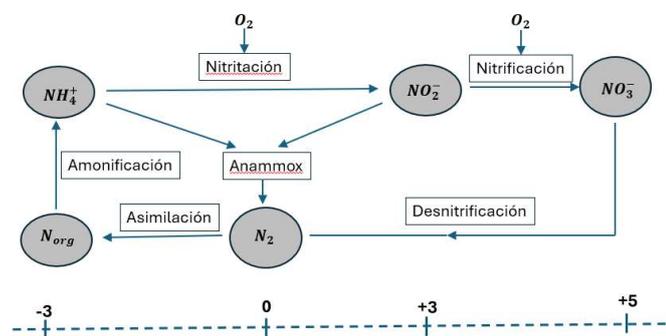


Figura 22 Transformaciones básicas remarcables de nitrógeno y estados de oxidación

La oxidación autotrófica tiene una velocidad menor que la de consumo heterotrófico de C, aunque con mayor energía de activación. Las más importantes de las oxidaciones autotróficas son las transformaciones aeróbicas con O_2 (de NH_4^+ en NO_3^- globalmente Nitrificación) que tiene una primera etapa desde a NH_3 (nitritación con especies de géneros *Nitrosomonas* y *Nitrosococcus*) hasta NO_2^- , y la segunda a partir de NO_2^- (nitratación sobre todo con especies del género *Nitrobacter*). La oxidación autotrófica anaerobia del NH_4^+ con NO_2^- (Anammox se realiza con diversas bacterias del orden *Planctomycetes*). En la Figura 22 se indican las principales transformaciones, aunque hay numerosas otras reacciones posibles autotróficas, por ejemplo, en presencia de SH_2 .

El vertido como NO_3^- no es aceptable por seguir contribuyendo a la eutrofización. En la Figura 22 se indica también la Desnitrificación, el paso de NO_3^- (y NO_2^-) a N_2 (que puede ser venteado) en una operación con heterótrofos desnitrificantes (*Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Paracoccus*). Algunas hacen la primera etapa de NO_3^- a NO_2^- . La desnitrificación requiere que: i) haya sustrato (dador de e^-), ii) que haya nitrato, procedente de tanque aeróbico, iii) ausencia de O_2 que impediría que el NO_3^- fuera aceptor de e^- , iv) suficiente velocidad, inóculo suficiente, v) considerar que en la reacción se genera álcali. El cierre de ciclo desde N_2 (gas) a NH_4^+ se realiza a través de numerosas reacciones de fijación, hidrólisis y descomposición.

Las actividades de la biomasa para realizar cada una de las transformaciones, se puede determinar midiendo las variaciones de concentración con el tiempo en fase líquida. La más frecuente la reducción de O_2 a partir de la saturación ($9,2 \text{ g/m}^3$ a 20°C) permite obtener la velocidad de consumo de sustrato por diferencia entre el consumo de O_2 después y antes de su adición, en que se consume sólo por respiración endógena. También en fase líquida se puede seguir el descenso de NH_3 , midiéndose la actividad de nitrificación, o con la disminución de NO_3^- , medirse la actividad de desnitrificación. La medida de la cantidad y

concentración del gas formado sobre el biorreactor permite medir las actividades de desnitrificación y de Anammox. La medida en el gas también se utiliza para medir la actividad metanogénica en el caso de procesos anaerobios.

VI.2.C. Eliminación de materia con fósforo

El contenido de P en las células es sólo el 2% (frente al 12% del N en peso), por lo que la eliminación a través de la purga de células no elimina suficientemente el P que se requiere en una EDAR. Hay no obstante algunos microorganismos (del género *Acinetobacter* y algunas *Pseudomonas*) que acumulan fósforo (PAO) en mayor cantidad y que son la base del proceso biológico de eliminar fósforo involucrando periodos anaerobio y aerobio.

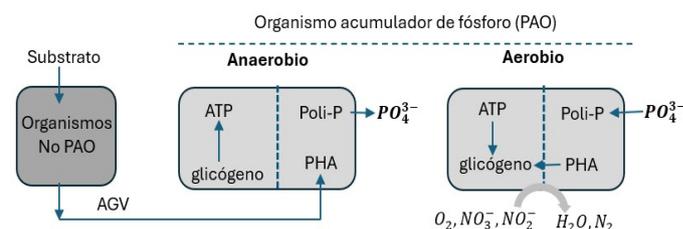


Figura 23. Proceso básico de la eliminación biológica de fósforo

Como se indica en la Figura 23 en la etapa anaerobia se incorporan compuestos fácilmente degradables como ácidos grasos de cadena corta (AGV) acumulándolos como polímeros de reserva, polihidroxialcanoatos (PHA). La energía de esta captación procede de la degradación del glicógeno almacenado y del polifosfato (Poli-P) que se transforma en ortofosfato (PO_4^{3-}) soluble que sale al exterior. En fase aerobia (O_2) o anóxica (NO_3^- , NO_2^-) se oxidan los polímeros de reserva (generando crecimiento celular), se recupera el glicógeno y se incorpora en el interior el Poli-P a partir del PO_4^{3-} exterior. En el proceso han crecido células, y si se hace la sedimentación al final de aerobiosis se separa el fósforo con el lodo.

VI.2.D. Diferentes dificultades para la biodegradación

- i.- Diversidad de compuestos. La composición de las corrientes puede presentar grandes diferencias según los tipos de compuestos presentes, cuya biodegradabilidad no es fácil predecir. Algunas consideraciones bastante generales son que la ramificación la dificulta; algunos sustituyentes como C-Cl o C- NO_2 dificultan el ataque, o que los compuestos hidrofóbicos o con alta carga son difíciles de tratar.
- ii.- Algunos compuestos de interés son difícilmente biodegradables. Entre ellos están los polímeros, incluidos los polímeros biológicos, polisacáridos, lípidos y proteínas, así como otros artificiales de más compleja biodegradación. Son bien conocidas las dificultades para la biodegradación de algunos compuestos industriales como los polímeros clorados y los nitroaromáticos.

iii.- Sustratos mezclados. Es lo habitual, en ocasiones se produce su consumo secuencial (diauxia), otras veces se realiza de forma simultánea. La presencia de tóxicos puede dificultar grandemente la biodegradación de otros. Pero también hay efectos cometabólicos, en que se degrada un compuesto gracias a la presencia de otro que soporta el crecimiento. Otra complejidad se produce si se deben tratar contaminantes que están muy diluidos.

VI.3. PROCESOS DE SEPARACIÓN.
TRANSFERENCIA ENTRE FASES

Los procesos de separación son muy importantes en las plantas de tratamiento de aguas actuales, y previsiblemente crecerán en el futuro. Los que finalmente se implantan deben ser asequibles económicamente para grandes caudales y llevarse a cabo posiblemente en sucesivas etapas, en cada una con la operación más adecuada. Los procesos que se ponen en operación dependen de las características de partida (tamaño, densidad, concentración), y del objetivo de salida (calidad, normativa legal para el vertido o reutilización). Las funciones objetivo son las económicas, experiencia previa, seguridad, así como otras consideraciones específicas en cada momento.

VI.3.A. De la fase sólida

La separación de la fase sólida del medio acuoso se ha mostrado como esencial en tratamientos primarios, y también lo es para separar la biomasa que procede del biorreactor. En todo caso, junto con variables como la diferencia de densidades o la fuerza impulsora, es importante el tamaño de los componentes a eliminar. En la Figura 24 se muestran algunas operaciones habituales según sea el tamaño a separar. En la parte superior dos operaciones basadas en velocidad de las partículas sometidas a una fuerza de gravedad (g), o centrífuga que puede generar muchas g's. Los órdenes de magnitud de los tamaños señalados en abscisas son valores aproximados para partículas orgánicas (densidad próxima al agua), siendo valores inferiores para partículas inorgánicas que pueden tener densidad dos o tres veces superiores. La filtración convencional es una operación usual en particular en ETAP, pero también en EDAR como proceso complementario. El resto se consideran operaciones con membranas, muy frecuentes en sistemas de tratamiento de aguas industriales, en el tratamiento terciario y también para potabilización de agua salina en ETAP.

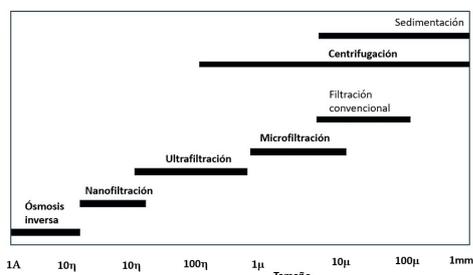


Figura 24. Intervalos de separación con procesos de separación de velocidad y de filtración

En las EDAR son procesos de separación estándar:

i) En los **tratamientos primarios**, la concentración de inorgánicos es importante y suelen presentarse menos problemas que en los secundarios, aunque es frecuente el uso de coagulante y de floculante.

ii) La sedimentación después del **tratamiento biológico** (secundario) con unos sólidos de densidad próxima al agua ($\pm 10\%$) suele presentar más problemas. Conviene recordar que para la separación de sólidos conviene tener partículas grandes, lodos floculentos, con mayor carácter en algunos tipos de bacterias. Los problemas de sedimentación en la operación práctica pueden ser más difíciles de resolver que los relacionados con la degradación en operación aerobia.

El mayor problema suele ser el denominado **hinchamiento por microorganismos** "filamentosos" (*bulking*), mencionándose algunos microorganismos como *Microthrix parvicella*, *Sphaerotilus natans* o *Tipo 021N*. El crecimiento de este tipo de microorganismos depende de las características del agua, los compuestos y sus concentraciones. Por ello también influye la tecnología y tamaño de equipos, así algunas observaciones como que concentraciones del orden de 0,3 kg DBO/kg SST d, sedimentaban bien han definido los valores habituales que se utilizan en el diseño de las operaciones. El seguimiento del volumen que ocupan los lodos sedimentados al cabo de cierto tiempo por g SST/L (denominado Índice de volumen de lodos, IVL) se utiliza para saber si se espera buena sedimentabilidad, (por ejemplo, se puede producir *bulking* si es mayor de 150). En situaciones concretas, como prevención se pueden introducir elementos adicionales como selectores (de microorganismos), y para situaciones de urgencia el uso de reactivos químicos, como el cloro.

Otro problema es el efluente turbio por crecimiento disperso, si no hay biofloculación, o incluso por ausencia de filamentos "pinpoint floc" ($IVL < 50$). También se pueden presentar problemas por la formación de espumas que puedan arrastrar fangos, o la ascensión de fangos debido a la formación de N_2 por desnitrificación.

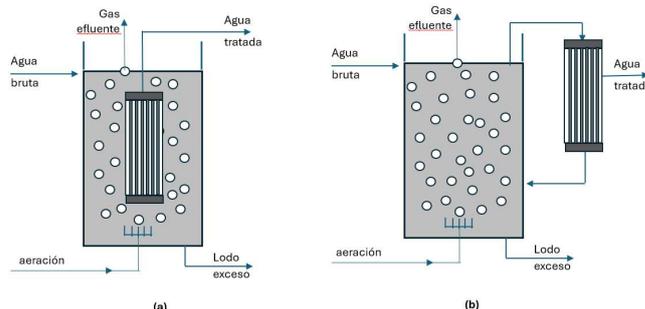


Figura 25. Biorreactores de membrana; (a) membrana sumergida, (b) membrana externa

La separación **por membranas** evita alguno de los problemas mencionados y se puede tener una mayor eficacia de separación. La configuración como biorreactor (Figura 25) suele

ser la más habitual, incluso integrando la biorreacción y la separación en un sólo equipo. Las dos configuraciones básicas son, con la membrana sumergida en el biorreactor, o con bombeo exterior a la membrana recirculando el retenido al biorreactor.

VI.3.B. De la fase gas

La separación de la fase gas del sistema de biorreacción es importante. Se ha indicado anteriormente que la estequiometría mostraba la conversión de sustratos en células, por tanto en lodos, en otros productos solubles y también en gases siendo mayoritarios CO₂ en aerobio y CH₄ en anaerobio.

i) En el caso de procesos **aerobios**, debe reconocerse la importancia de que la introducción de aire (o de O₂) produce el arrastre de gases y compuestos orgánicos volátiles (COVs) compuestos aromáticos y alifáticos. También de partículas de agua que se ha considerado otro problema, en particular con el uso de turbinas superficiales y en los últimos años se ha hecho hincapié en la liberación de N₂O en las EDAR sobre todo en las operaciones de nitrificación-desnitrificación. Se ha comprobado también que se producen arrastre de microplásticos.

ii) En procesos **anaerobios** la liberación de gases resulta más difícil debido al menor efecto de desgasificación y arrastre, por lo que en ocasiones debe colocarse una etapa para la separación de gases. Además de metano, se forman gases reducidos en presencia minoritaria. Suelen proceder de la reducción de materiales azufrados formándose gases como SH₂ que además de malos olores (umbral olfativo muy bajo de alrededor de 14 mg/m³ a temperatura ambiente) contribuye a la corrosión de instalaciones y a problemas de salud.

iii) El **tratamiento de olores** es una operación frecuente en las plantas EDAR. Los olores se producen sobre todo al degradarse la materia orgánica en condiciones anóxicas con NO₃⁻ como aceptor o en condiciones anaerobias sobre todo con bacterias sulfatorreductoras, transformándose el sulfato en sulfuro, formándose otros compuestos de azufre como mercaptanos. También se forma amoníaco que se libera a valores de pH elevados, aunque su impacto suele ser menor. Estos gases se producen en las redes de alcantarillado, además de en los tratamientos de aguas y de lodos, siendo la primera recomendación reducir su formación evitando la aparición de condiciones anaerobias.

Su tratamiento suele comenzar con la captación de los gases en los diversos puntos donde se producen. A continuación, se colocan las operaciones de tratamiento que podemos dividir en:

- Químicos. El más usado es la absorción o lavado de gases, usándose también la oxidación (térmica o catalítica),
- Físicos como la adsorción gas/sólido con carbón activado,
- Bioprocesos como los biolavadores por ejemplo en lodos activados, o de forma específica el uso de biofiltros que se han colocado de forma abundante más recientemente.

VI.4. LOS PROCESOS HABITUALES EN PLANTA

VI.4.A. Para eliminar la materia carbonada

El proceso básico actual de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de materia carbonada es el de **lodos activados**. Este incluye las dos “herramientas”, la etapa de aeración y la etapa de separación de lodos, usualmente una sedimentación, recirculando los sólidos sedimentados salvo una fracción equivalente a la que se forma en el tanque de aireación, que se purga y lleva al tratamiento de fangos. La denominación “activados” se debe a su carácter activo adsorbiendo de forma rápida la materia orgánica, que después requiere su degradación para que el lodo vuelva a adsorber. Es importante la forma de flujo del líquido tanto en el aireador como en el sedimentador.

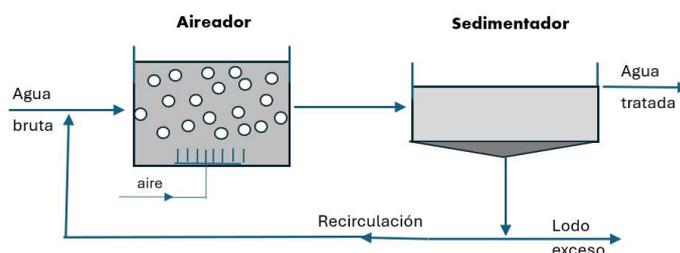


Figura 26. Esquema básico de lodos activados

El esquema de los lodos activados (Figura 26) puede representar el 90% de los procesos de tratamiento de materia carbonada. Otro esquema, más antiguo incluso, es el **filtro biológico (percolador)** en el cual la aireación se produce al rociar el líquido sobre un lecho fijo en el que va percolando, en contacto con las biopelículas de biomasa que se fijan en los soportes. Por la parte inferior se recoge el líquido tratado, que ha arrastrado algunas de las películas que deben separarse. Para hacer que esta cantidad separada sea equivalente a la que ha crecido se ajusta la velocidad de descenso regulando el reciclo. También se pueden encontrar otros sistemas como los discos biológicos, o soportes sólidos móviles.

Respecto a los **lodos activados**, se indican algunos datos generales. Tienen eficacias del 90-95%, con concentración de biomasa alrededor de 1500-4000 g/m³ de SSV, representando aproximadamente el 75% de los sólidos totales SST, con un tiempo de residencia de 5-8 h, y reciclo del 25-50 %. Los aireadores son críticos, pudiendo ser mecánicos (turbina que gira cerca de la superficie) o sobre todo de burbujeo (alrededor de 0,3 L/s por difusor). Aunque con diferencias pueden aportar alrededor de 1,5-4 kgO₂/kWh, al tiempo que producen mezcla. Cuando se requiere de forma separada la mezcla pueden estimarse necesidades de alrededor de 20 W/m³. La carga orgánica que se alimenta (intensidad de carga) suele ser alrededor de 0,3 kgDBO5/kg SST día para eliminar carbono, y menos de 0,15 para nitrificación. En la sedimentación con equipos tradicionales, debe requerirse una velocidad de ascenso superficial de 30-40 m³/m²d para la clarificación, y 70-140 kg SST/m²d para buen funcionamiento del espesamiento, aunque el uso de sistemas como las lamelas pueden permitir velocidades de ambos parámetros bastante más altos. Hay diversas modifica-

ciones ya clásicas de lodos activados como la aeración extendida, o por etapas, o métodos como contacto /estabilización, y también empieza a ser más frecuente la introducción de membranas, para la separación de lodos.

VI.4.B. Para eliminar nitrógeno y fósforo

La **eliminación de nitrógeno** precisa como se ha indicado de dos etapas, nitrificación y desnitrificación. Colocar delante la nitrificación parece más fácil de justificar pensando en que primero se forma el nitrato que después se transforma en N₂. Sin embargo, es más habitual colocar delante la desnitrificación que aprovecha la materia orgánica de entrada, mientras el nitrato llega desde la etapa final de nitrificación mediante un reciclo a cabeza. Así después de la nitrificación se coloca la sedimentación que resulta así más eficaz (Figura 27.a). Conviene comentar que el uso del nitrato como aceptor produce un ahorro de O₂ (2,9 gO₂/gN-NO₃⁻) que podría ser el 63% de las necesidades para nitrificación, y que puede haber desnitrificación no controlada por la liberación de N₂ que resuspende el lodo. En lugar de hacer el proceso en continuo, puede hacerse en un solo tanque (**reactor secuencial**) regulando los tiempos para llenado, desnitrificación, nitrificación, sedimentación/vaciado, u otras disposiciones que se precisen.

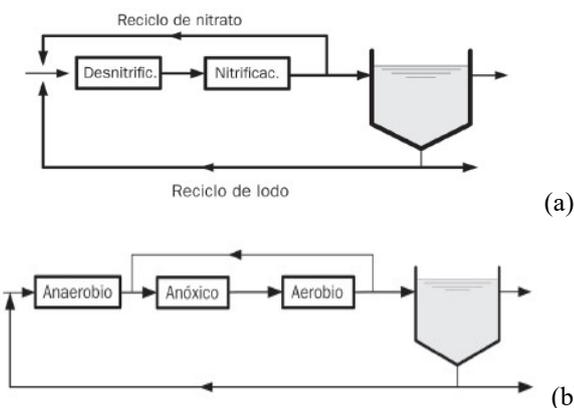


Figura 27. (a) Proceso de eliminación de C y N con desnitrificación a la entrada, (b) Ejemplo de un proceso de eliminación de C, N, P (proceso A2/O)

La **eliminación de fósforo** requiere como se ha explicado, que se tengan etapas anaerobia y aerobia. En la práctica suele diseñarse para la eliminación global de C, N y P, habiéndose propuesto y patentado numerosos procesos. Quizás el más conocido es el denominado A2/O que se compone de una etapa anaerobia para el proceso de P, un anóxico para desnitrificar y un aerobio para eliminar el C y retener el P en las células que se someten a continuación a sedimentación (Figura 27.b). Resulta importante la regulación de reciclos. Otro proceso bastante difundido es el Bardenpho de 5 etapas (anaerobia-anóxia-aerobia-anaerobia-aerobia-sedimentación), extensión del de dos etapas (anaerobio-aerobio) para C y P solamente.

VI.5. DIMENSIONADO

La descripción científica de los procesos es una primera etapa muy importante, también lo es el dimensionado y otros aspectos como las necesidades físicas, los materiales y la forma de operación. El dimensionado pretende indicar los tamaños, tiempos y condiciones de operación de las etapas del proceso. Podemos pensar que la mayor velocidad de transformación del producto buscado conduciría a necesitar equipos más pequeños o menos tiempo de operación, por lo que resulta importante para el dimensionado. Una vez introducidos la velocidad y forma de flujo en el balance de materia y energía, la incorporación de la estequiometría permite calcular las cantidades que se obtienen de los diferentes productos.

La modelización y dimensionado se basa en hacer balances de materia y de energía a los diversos componentes del sistema a cada una de las etapas. Incluso se puede requerir a cada una de las fases involucradas. Una vez descrito lo que ocurre en una etapa, deben conectarse las corrientes de las diversas etapas, para tener las características finales. En cada etapa los balances tienen la forma de que entrada-salida + lo que se forma = lo que se acumula. La cinética resulta importante porque la transformación sería $\int_V r_i dV$ en los balances de materia, o $\int_V r_i(-\Delta H_{r,i})dV$ en el de energía. La materia que se acumula sería $\frac{d}{dt} \int_V c_i dV$. Si la concentración y temperatura en todos los puntos de la etapa es la misma, sistema perfectamente mezclado (PM), se pueden eliminar los términos integrales. La mayoría de los modelos en tratamiento de aguas asumen esta aproximación, que aunque no es posible de forma estricta, será más aceptable si la agitación (P/V) es alta y por tanto los tiempos de mezcla son pequeños.

Un problema específico es que el número de componentes reales es teóricamente inasumible, por lo que los primeros modelos se basaron en sustrato como DQO y autocatálisis con los microorganismos evaluados como los sólidos suspendidos volátiles (SSV). Este enfoque tradicional conduce a ecuaciones del tiempo de residencia como $\tau = \frac{S_i - S}{X} \left(\frac{K_S S^{-1}}{\mu'} + \mu'^{-1} \right)$ siendo $\mu' = \mu/Y_{X/S}$, y donde τ es el cociente entre volumen del aerador y el caudal, por lo que conocido el caudal a tratar se calcula el volumen preciso.

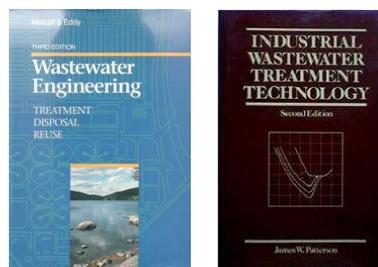


Figura 28. Algunos textos de referencia para aguas residuales, el de Metcalf y Eddy para EDAR y el de Patterson para industriales

El libro de Metcalf y Eddy es seguramente el mejor texto del tratamiento de aguas de la historia, que se ha basado en la forma

mencionada para la modelización (Figura 28). Las aguas industriales presentan gran diversidad, siendo textos como el de James Patterson entre los más influyentes.

Posteriormente se ha ido ampliando el modelo estableciendo diferentes tipos de biomasa por su función (no las especies), diferentes sustratos, con diferentes tipos de DQO y de materia nitrogenada, O₂ y productos, incluyendo un número creciente de transformaciones. Para hacer los balances a componentes y transformaciones que pueden ser algunas decenas, y organizar los modelos, se hacen matrices descriptivas como la que se indica, con sólo unos pocos términos, en la Figura 29.

Componentes	Biomasa	Sustratos	Oxígeno	Productos	Cinética de la transformación
Transformación					
Crecimiento biomasa					
Muertes					
Hidrólisis					
Otras reacciones...					

Coeeficientes estequiométricos ν_i

Figura 29. Forma de una Matriz de Transformaciones con unos pocos componentes

Cada fila lleva una ecuación cinética indicada en la última columna, aplicada a la transformación de la primera columna, y los índices estequiométricos en el resto de la matriz. Uno de los modelos de más éxito fueron las aproximaciones de la Asociación Americana de Obras Hidráulicas (AWWA), y los desarrollados por la Asociación Internacional del Agua (IWA), habiéndose realizado la integración en modelos para todo el diagrama de flujo, y ofertados en diversas ofertas comerciales. Una dificultad es la necesidad de disponer de muchos parámetros cinéticos.

Disponer de un modelo del proceso no sólo sirve para deducir las dimensiones que deben ponerse, sino también para conocer las eficacias o caudales que se tendrán. Pueden utilizarse para el diseño, incluso en la etapa de operación, permiten comprobar la bondad del modelo, reajustar (*tuning*) parámetros del modelo para que concuerde con la realidad, para conocerla mejor o incluso utilizar ese modelo para valorar posibles modificaciones de las condiciones de operación o futuros diseños.



Figura 30. Algunas asociaciones que procuran el desarrollo del sector del agua

Las asociaciones para el desarrollo del tratamiento de aguas han tenido mucha importancia en su avance. En particular las mencionadas AWWA (<https://www.awwa.org/>) y la IWA (<https://iwa-network.org/>) han contribuido en el desarrollo de modelos. En España hay varias Asociaciones Empresariales, como AEAS, AEM, AEDyR, y en el ámbito académico de investigación en una forma muchísimo más modesta, la Mesa Española de Tratamiento de Aguas META (<http://www.redmeta.es/>) que organiza los Congresos Españoles de Tratamiento de aguas (Figura 30).

VI.6. ESQUEMA Y SISTEMAS MECÁNICOS

VI.6.A. Esquema general

Un esquema actual de tratamiento de aguas bastante general puede verse en la Figura 31. A continuación se presentan algunas representaciones de los diferentes equipos.

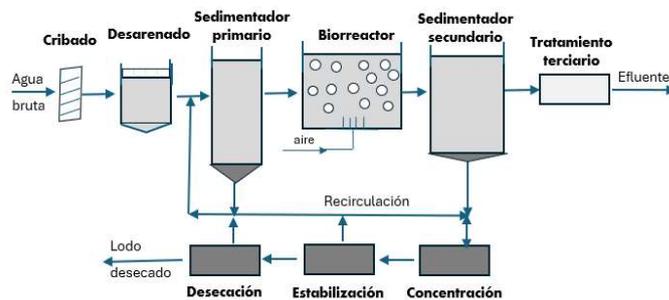


Fig. 31. Diagrama de una planta EDAR

VI.6.B. Algunos equipos del tratamiento

i.- Tratamientos primarios.

Los cribados, pretratamientos y los tratamientos físico-químicos han sido expuestos en el Apartado 5 en paralelo a los de potabilización, mostrando fotos de equipos de operación reales. Como resultado de estos tratamientos se tiene una corriente donde se han eliminado partículas inorgánicas y orgánicas de gran tamaño, quedando fundamentalmente materiales orgánicos de pequeño tamaño y disueltos.

ii.- Biorreactor. Aireación.

El agua que procede del tratamiento primario pasa (Figura 32.a) al biorreactor. Como se ha mostrado es frecuente el uso de aireadores situados en la base de unos tanques de unos 5-6 m de profundidad y en ocasiones en varios tanques estrechos (Figura 32.b). El aire asciende generando movimiento del líquido, pudiendo mostrarse celdas de líquido (Figura 32.c). Como se ha dicho, los aireadores de profundidad no son los únicos sistemas de aireación, pudiendo utilizarse también turbinas a nivel de la superficie, entre otros.

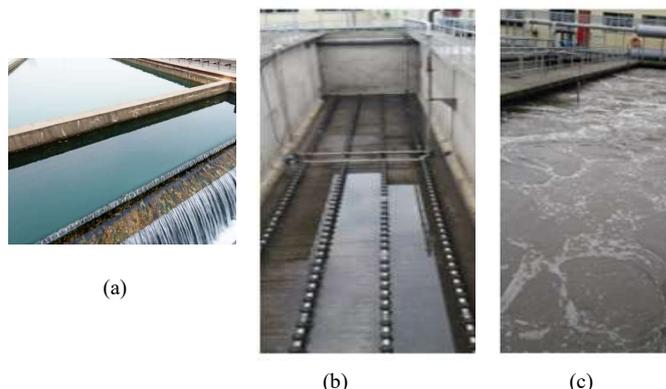


Figura 32. Paso desde el tratamiento primario (a), aireador en un tanque estrecho, (b) vacío (b) y lleno (c)

Aunque el sistema de lodos activados con sedimentación es el más utilizado, se comentaron anteriormente otras opciones como filtros biológicos percoladores y biodiscos (mostrado en la Figura 33.a). Otra opción integrada mencionada es el uso de membranas para la separación de lodos por ejemplo con las membranas en el interior del aireador como las mostradas en la Figura 33.b.

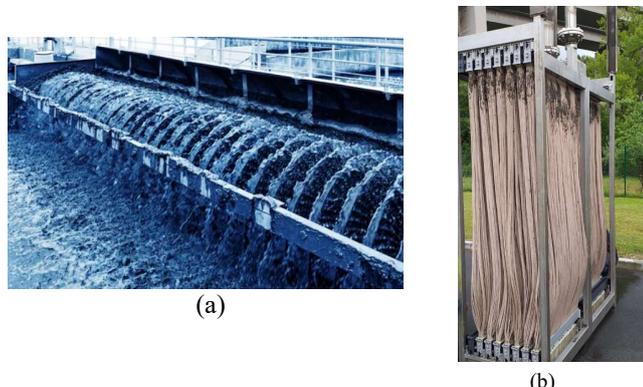


Figura 33 Sistema de biodiscos (a), Membranas en interior de biorreactor aireado (b).

iii.- *Sedimentación.*

En el sistema de lodos activados después del aireador tenemos el sedimentador, habitualmente circular de unos 3 m de profundidad, con un bloque girando, en la parte inferior arrastrando a los lodos hacia el centro donde se recogen y bombean al exterior. Se puede ver vacío en la Figura 34.a, y en la Figura 34.b se muestra la parte superior en funcionamiento con el vertedero en que el agua pasa por debajo de una placa.



Figura 34. Sedimentador vacío (a) y lleno mostrando el vertedero (b)

iv.- *Tratamiento terciario.*

La terminología no es generalizable de forma general, aunque suele referirse al que permite la reutilización del agua. Actualmente se considera frecuentemente la colocación de una filtración, biofiltro, y el uso de membranas, sobre todo ultrafiltración (para tamaño mayor de unos 1000 Dalton) y ósmosis inversa para retener sales (Figura 35.a). También tradicionalmente se incluye aquí la desinfección (cloración, ozono o UV como se indicó en tratamiento de aguas potables). Para reducir impactos, con frecuencia se debe considerar la colocación de la eliminación de olores, desodorización (Figura 35.b) ya comentado anteriormente.

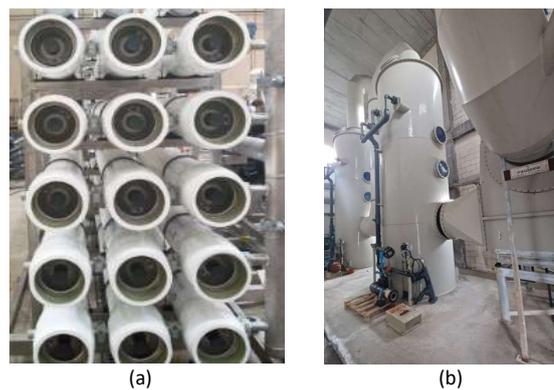


Figura 35. Filtración con membranas (a), y equipo de desodorización (b)

VI.7. PROCESOS DE TRATAMIENTO NO BIOLÓGICOS

VI.7.A. *Tratamientos complementarios al biológico*

- i.- En la eliminación de **nitrógeno** se pueden utilizar también
 - Para NH_3 , la desorción si la concentración de amoníaco es alta, bajando el pH hasta un valor aproximado 11, usando como desorbedor aire o vapor de agua.
 - Para NO_3^- se puede utilizar intercambio iónico o membranas.
 - Con aminas se pueden llevar a cabo reacciones con cloro a pH 7-9 obteniendo cloraminas.

- ii.- Para la eliminación de **fósforo**, se han utilizado algunos métodos fisicoquímicos
 - Precipitación . Con adición de cal hasta llegar a pH 10,5 precipitando el hidroxilapatito, o con Al o Fe precipitando ortofosfatos.
 - También se ha utilizado el intercambio iónico.

VI.7.B. *Tecnologías específicas*

Podemos clasificarlas en las de separación, de oxidación e incineración, y tecnologías en desarrollo. Muchas de ellas se han utilizado sobre todo para aguas residuales industriales.

i.- *Tecnologías de separación.*

Se separan físicamente los contaminantes transfiriéndose a otra fase. Podemos mencionar la filtración, la adsorción e intercambio iónico y operaciones de membranas (electrodialisis y ósmosis inversa). La **adsorción** con carbón activo se utiliza con frecuencia como forma de finalizar el tratamiento y cumplir con la normativa legal. Suele ser un proceso caro, y un uso sólo ocasional.

La **contaminación por metales**, que suele proceder de vertidos industriales, debido a su carácter tóxico y bioacumulable, es un problema importante en el medio natural y en los diversos vertidos, con normativa muy estricta para algunos metales más tóxicos. Las técnicas convencionales de tratamiento, sobre todo precipitación química y procesos electroquímicos son bastante eficaces, aunque resultan caros. La precipitación suele ser bastante selectiva, utilizándose sobre todo el ajuste de pH (también con sulfuros) retirándose los metales mediante

floculación y sedimentación, debiéndose gestionar el residuo. Los procesos electroquímicos no dan fangos, aunque resultan caros, en una oxidación en ánodo se puede pasar a Cr(III) a Cr(VI) o mediante reducción de cátodo depositándose el metal que después debe ser "raspado".

Otros tratamientos convencionales son: a) para altas concentraciones la extracción con disolventes, b) para bajas concentraciones la adsorción e intercambio iónico, y c) si se quiere una purificación elevada del agua, ósmosis inversa y evaporación. La adsorción de metales en adsorbentes biológicos (biosorbentes) ha sido bastante estudiada con distintos materiales, siendo función del metal, pH, temperatura, tiempo de contacto, y la competencia con otros sorbatos, pero el proceso no está establecido industrialmente a gran escala.

ii.- Oxidación.

La oxidación química suele conducir a compuestos más biodegradables (e integrables en el proceso biológico), o llegar a inertes como CO₂ y H₂O. También puede producirse algún compuesto más tóxico. Los oxidantes tradicionales son los compuestos de cloro, permanganato, peróxido de hidrógeno, ozono y persulfato.

Se habla de procesos de *oxidación avanzada* cuando se procura la generación de radicales hidroxilo ([•]OH) a temperatura ambiente. Entre ellos se pueden citar: a) Combinar radiación UV con H₂O₂; b) Proceso Fenton (Fe²⁺/H₂O₂) incluyendo su acoplamiento con UV, fotocatalisis por ejemplo con TiO₂; c) Ozonización. El ozono se comenzó a utilizar en los años 70 para desinfección al describirse los problemas del uso de compuestos clorados con la formación de trihalometanos. Se ha usado también para eliminar hierro y manganeso en aguas potables, y para tratar aguas residuales directamente o en combinación con H₂O₂ (método peroxone) o con radiación UV.

Otros procesos de oxidación no clásicos son la oxidación húmeda, oxidación húmeda supercrítica, cavitación hidráulica, e incluso con plasma. Las dos primeras tienen además una importante posible aplicación en el aprovechamiento de los lodos, en la etapa de ruptura celular previa a los procesos de separación. En la práctica se trabaja también con procesos combinados, muchos en desarrollo que combinan la radiación UV, 100-400nm de distintas energías ($E = hc/\lambda$) y efectos, llegando a la desinfección. En el tratamiento con H₂O₂ se forman ²OH con el intervalo de baja longitud de onda λ . En fotoFenton el Fe³⁺ con agua genera [•]OH dando una mayor cantidad de hidroxilo, funcionando mejor que el Fenton, aunque sigue precisando que se trabaje a pH<4. En fotocatalisis la UV con $\lambda < 400$ nm) en la superficie del semiconductor (por ejemplo, TiO₂) los compuestos orgánicos reaccionan con agua dando [•]OH. Esta cantidad se puede aumentar añadiendo oxidante, por ejemplo, H₂O₂ o O₃. Conviene indicar que la opción de incineración sólo resulta interesante para bajos volúmenes por su coste.

Otra opción de tratamiento químico es el uso de reductores (en lugar de oxidantes) como Fe(0) o sulfito.

iii.- Nuevas tecnologías en desarrollo.

Se están incorporando un buen número de tecnologías, así:

- Para compuestos refractarios al tratamiento biológico, ya es frecuente acudir a la adsorción con carbón activo que puede regenerarse por el fabricante. También se plantea la oxidación, química como H₂O₂-Fe²⁺ (Fenton) o térmica a unos 200°C.
- Siguiendo el desarrollo actual de la electrificación se plantean tecnologías electroquímicas como la electro-deposición, electrocoagulación, electroflotación y electro-oxidación. Los sistemas bioelectroquímicos en los que una de las reacciones, anódica o catódica están catalizadas biológicamente, han recibido interés recientemente. En particular las celdas de combustible microbianas (MFC) que producen energía eléctrica directamente, y las celdas de electrolisis microbianas (MEC) en las que se obtiene H₂ por el aporte de energía.
- La incorporación de biosensores y en general de tecnologías de la información y las comunicaciones se consideran clave para la operación y competitividad de las plantas.

iv. Los contaminantes emergentes.

Se consideran emergentes por incorporarse el conocimiento de su impacto en la salud humana y en la naturaleza recientemente presentando concentraciones más bajas que los contaminantes tradicionales ya mencionados, Muchos son productos de uso cotidiano, fármacos, productos de higiene personal, surfactantes, plastificantes y diversos aditivos que acaban en el alcantarillado. El impacto de estos productos se complica debido a su bioacumulación, persistencia y tiempo de acumulación; pero además resultan complejos sus mecanismos de transformación, que pueden dar productos intermedios incluso más tóxicos que los originales. El RD1290/2012 y la actualización del RD 665/2023 recogen las normas de calidad ambiental en aguas, pero no se establece aun en forma detallada para emergentes.

Su tratamiento precisa tecnologías no sólo eficaces, si no también asumibles en la práctica y eficientes. Si se encuentran por ejemplo en concentraciones de mg/m³ (ppb) en un medio bastante limpio, la adsorción con carbón activo, en polvo o granular, en suspensión o en lechos fijos, puede ser adecuada. En casos como aguas residuales incluso tratadas, la competición con otros compuestos orgánicos se hace difícil en el tratamiento por ejemplo por membranas. En algunas aguas industriales las concentraciones pueden llegar a g/m³ (ppm) o superiores, y convendrá hacer el tratamiento antes de diluir, entonces la adsorción tiene el problema de saturación rápida, y puede ser interesante la oxidación, destrucción como se ha indicado anteriormente. También se han planteado métodos eléctricos, en particular electrolisis.

Un caso diferente es la presencia de micro y nano plásticos cuyo impacto en aire y en aguas se ha descrito ampliamente en los últimos años. Se ha determinado su presencia en agua potable, y la eficacia de su retención en los lodos durante el tratamiento biológico.

VI.7.C. Aguas no urbanas

i.- Aguas industriales.

Se suelen definir excluyendo las urbanas y escurrientías, incluso las agrícolas se suelen excluir por su especificidad. Con frecuencia tienen alta carga orgánica e inorgánica, presencia de componentes tóxicos y sustancias difícilmente o no biodegradables. Por ejemplo, los lavaderos de minerales contienen sobre todo materiales en suspensión, las industrias químicas de limpieza y recubrimientos principalmente compuestos inorgánicos, las refinerías químicas y textiles productos orgánicos e inorgánicos; y las industrias papeleras, azucareras y alimentarias sobre todo productos orgánicos.

En su tratamiento es frecuente colocar al principio un tanque de uniformización, desbaste, desarenado, desengrasado y control de pH. A continuación, se suele elegir entre un buen número de técnicas de separación: sedimentación, flotación, precipitación química, filtración, extracción, adsorción, evaporación y operaciones de membranas en especial ósmosis inversa. La elección depende del objetivo, y la presencia de sólidos en suspensión, aceites, compuestos orgánicos, volátiles, metales y tóxicos. En cada caso debe seleccionarse la combinación de operaciones que corresponda. Así por ejemplo para compuestos orgánicos la adsorción, extracción y ósmosis inversa; y para inorgánicos precipitación y ósmosis inversa. Es cada vez más necesario el tratamiento de contaminantes emergentes.

Dada la gran diversidad de componentes presentes, existen regulaciones para muchos de ellos. Es muy importante la aceptabilidad o no, de los vertidos en determinados medios o para plantas de tratamiento posteriores. La gestión apropiada de las aguas industriales exige conocer los costes de tratamiento y el cálculo del canon de saneamiento a pagar por la industria, que es función no sólo del caudal, sino también de la composición de contaminantes como sólidos en suspensión, N y P entre otros.

ii.- Otras. Aguas de origen agrario y ganadero.

Los objetivos de mantener la calidad del entorno y reducir la contaminación son muy importantes en el sector agrario, procurando si fuese posible, la valorización de los residuos. Minimizar su generación y una adecuada gestión de la aplicación en suelos y cultivos es una base previa para tratar el problema. Los purines de vacuno y porcino presentan alrededor del 10% de materia seca de la cual alrededor del 70% es materia orgánica, el 5% nitrógeno NTK y 1% de P, aunque varían bastante en las explotaciones y según se traten de porcino o vacuno.

El proceso de tratamiento empieza por el estercolero que debería estar cubierto y operar con TRH no muy elevado si se quieren evitar biodegradaciones. A continuación, suele colocarse una separación sólido/líquido mediante tamizado, pudiendo retenerse hasta el 50% de los sólidos, utilizándose en ocasiones coagulación /floculación. La estabilización se suele realizar mediante digestión anaerobia, la fracción sólida antes retenida a unos 35°, mientras la líquida se puede tratar en termofilia a unos 50°C. Otra opción para la fase sólida es el compostaje y su uso como abono, mientras para la fase líquida

se puede aplicar directamente al terreno, aunque se podrían aprovechar los nutrientes, por ejemplo, mediante desorción, absorción y precipitación química.

VII. TRATAMIENTO DE LODOS

VII.1. DIVERSIDAD DE TRATAMIENTOS

A lo largo del proceso de tratamiento de aguas se van formando lodos de distinta naturaleza más o menos orgánica o inorgánica, en términos de kg DQO/kgSV, alrededor de 1,4 en lodos del primario y 1,7 del secundario. La concentración suele ser > 0,5% de sólidos si procede de lodos activados, y hasta > 10% si procede de procesos anaerobios. Los tratamientos procuran sobre todo aumentar la concentración de sólidos eliminando agua y reduciendo su volumen, así como también su estabilización, que a veces se intensifica. En algunos casos se procura un aprovechamiento posterior y en otros se lleva a cabo su deposición sin apenas estabilización.

El agua que contiene los lodos se puede clasificar en libre o ligada. El agua libre, no ligada al sólido, puede separarse por gravedad, mientras la ligada presenta diferentes formas: intersticial (dentro de flóculos y células), vecinal (en superficie de sólidos), de hidratación (ligada químicamente), y su separación requiere distintas operaciones, sedimentación, centrifugación, o incluso tratamientos térmicos o químicos. La deshidratabilidad puede requerir añadir acondicionantes, pudiendo medirse por el tiempo de succión capilar (TSC).

El movimiento de los lodos, con un alto contenido de sólidos no resulta sencillo. Su comportamiento como fluido (reología), suele caracterizarse con el modelo de Herschel-Bulkley, pero con grandes concentraciones de sólidos llega a tener un comportamiento viscoelástico. Los lodos de la sedimentación primaria o secundaria (biológica) pueden tratarse de forma separada, aunque habitualmente se hace ya mezclados. Previo acondicionamiento, habitualmente con coagulante o floculante y en ocasiones añadiendo cal, pasan a diversas operaciones. Un esquema básico de las alternativas habituales se indica en la Figura 36.

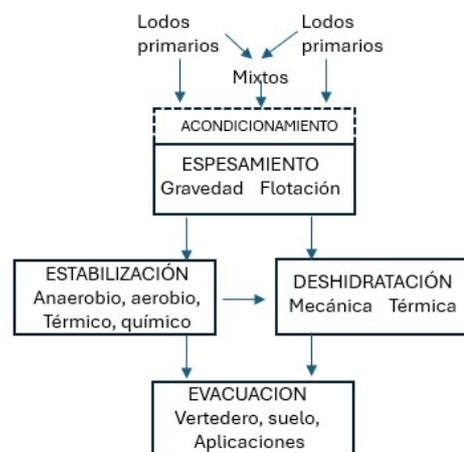


Figura 36. Etapas en el tratamiento de lodos

VII.2. CONCENTRACIÓN DE LODOS

Podemos considerar dos etapas, espesamiento y eliminación mecánica.

VII.2.A. *Espesamiento*

i. El **Espesado por gravedad** de los lodos en los sedimentadores (o clarificadores) aumenta la concentración de sólidos en la base y se recicla el efluente superior al sedimentador primario. Suelen ser cilíndricos de 3-4 m de altura con importante pendiente en el fondo. El flujo ascensional puede ser 16-32 m/d para lodos primarios y 4-8 m/d para lodos secundarios. El lodo no debe permanecer en el digestor más de 18 h para evitar olores y reducir la producción de gases.

ii. El **Espesado por flotación** de los lodos, es análoga a la flotación que compete con la sedimentación en el tratamiento de aguas. En la operación se disuelve previamente aire en el líquido a presión y cuando se reduce ésta en el tanque, el agua sobresaturada libera el aire en exceso en forma de burbujas ($D_b < 100\text{mm}$) que atrapan o adhieren flocúlos llevándolos a la superficie donde se puede recoger la espuma con los sólidos. Para aumentar la cantidad de burbujas se aumenta el caudal de líquido mediante recirculación, y suelen añadirse polielectrolitos (~1g/kg sólidos secos) para captar mejor los sólidos. La velocidad de carga de líquido suele ser alrededor de 50 m/d, y la de sólidos 100 kg/m³ d (Figura 37).

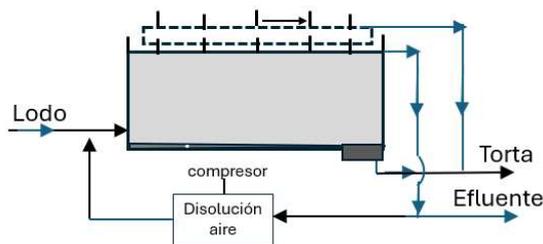


Figura 37. Esquema de equipos en la concentración de fangos por flotación

VII.2.B. *Eliminación mecánica*

Se indican a continuación algunas operaciones habituales:

i. En la **Centrifugación** el lodo se introduce en el centro del equipo que gira entre 200-8000 rpm, y a la vez que avanza se recoge el sólido de la zona de pared, y el líquido de la central. La elevada concentración de sólidos, que puede llegar al orden del 20% a la salida, afecta a su movimiento y eficacia.

ii. La **filtración a vacío** continua, suele consistir en un cilindro o tambor que tiene alrededor del 30% sumergido, que gira, y descarga el sólido adherido a la superficie mediante una cuchilla o raspador. Se obtiene una fase sólida con un 10-30% de sólidos (materia seca). Existen buenas teorías y experimentos para simular este equipo, así como para centrifugación (Figura 38).

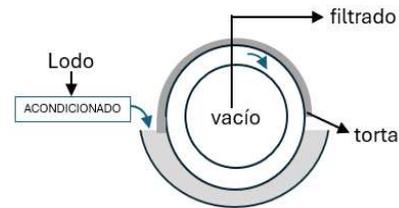


Figura 38. Esquema de equipo de concentración de fangos: Filtración a vacío

iii. En los **filtros banda** el lodo se descarga entre dos telas filtrantes. Al principio el líquido se separa por gravedad, y conforme las telas avanzan impulsadas por rodillos que van comprimiendo las telas, el filtrado cae drenado y los sólidos llegan al final retirándose con un raspador. Se puede pasar desde concentración de sólidos 1-10% hasta 12-40% (Figura 40 en VII.4).

iv. Los **filtros a presión**, de placas, eliminan el agua presionando el lodo (7-20 bar) a través de placas de tela con tamaño de poros menores de 100 mm, durante 1-2 h. Una vez filtrado se puede lavar para eliminar contaminantes, se pasa aire para desplazar el agua residual, se separan las placas, se deja caer la capa de sólidos (2-5cm de espesor) y se vuelve a cargar. La operación es discontinua con ciclos de unas 5 h. Puede llegar a obtenerse el 50% de concentración de sólidos (Figura 40 en VII.4).

VII.2.C. *Eliminación térmica*

La operación de secado se utiliza en algunos residuos de bajo volumen, en particular en operaciones industriales. También se ha utilizado secado natural si se dispone de espacios importantes.

La incineración se ha planteado como la recuperación energética de la entalpía de la materia orgánica. Su operación debe contemplar la cantidad de calor necesaria para preparar el material hasta los límites precisos para su combustión, con una tecnología adecuada a ese objeto. Se ha aplicado en muchos países europeos, incluyendo buenas tecnologías de tratamiento de los gases de combustión, que eliminan por ejemplo dioxinas, con un coste que puede ser 1/3 del total. También ha tenido mucha oposición por la pérdida de material valioso, la valoración del reciclaje, y por los impactos locales. Las cenizas resultantes de la combustión se han estudiado para diversos usos en construcción. Un ejemplo que contribuye a la descarbonización en la fabricación de cemento es la incorporación de lodos, con secado previo, al combustible de los hornos rotatorios en los que se fabrica del clinker.

VII.3. ESTABILIZACIÓN. DIGESTIÓN

El primer objetivo de la digestión ha sido la estabilización de fangos, en particular microbiológica. Después se han ido buscando otros objetivos como ha sido en particular el aprovechamiento energético del biogás producido si la digestión es anaerobia.

VII.3.A. Digestión anaerobia

Los principios de la digestión anaerobia ya han sido comentados. Se señalan ahora algunos parámetros habituales del diseño. La forma de los digestores suele ser cilíndrica de hasta 40 m de diámetro y 20 m de altura (aunque para facilitar el material sedimentable también se han colocado con forma de huevo. La temperatura más frecuente es 35°C (mesófilo) aunque hay tendencia a unos 55°C (termófilo) para tener más velocidad y eliminar patógenos. En condiciones mesófilas puede eliminarse alrededor del 45% de SSV. La alcalinidad en el digestor estable suele ser 2-5 g/L, que se consume por CO₂ y AGV. La alcalinidad total y la acidez volátil son dos de los parámetros más utilizados para promover la estabilidad.

Al menos en el diseño básico suele considerarse mezcla completa con igual tiempo de residencia del líquido (TRL) y del sólido (TRS) de unos 20 d, valor con el que se suele alimentar 1-3 kgSV/m³d. La agitación más frecuente puede ser por recirculación del gas (5-10 W/m³), aunque también se ha usado la recirculación de la masa en digestión o incluso la agitación mecánica. La alimentación se suele precalentar, perdiéndose calor al exterior desde el digestor con un valor del coeficiente global de transmisión de calor alrededor de 2-5 W/m²°C.

Respecto al biogás, considerando que se obtengan 0,35 Nm³CH₄ por kg DQO eliminado, con un calor de combustión de metano 11 kWh/Nm³, se obtiene del orden de 3,8 kW·h por kg DQO eliminado. La composición del biogás suele ser alrededor de 65% v/v de CH₄, del 1% de N₂ así como de SH₂ y el resto CO₂. Las formas convencionales de aprovechamiento del biogás son para combustión en caldera (eficacia próxima al 90%) y producción de energía eléctrica (alrededor del 35%) en ciclo combinado.

La reducción de CO₂ en el biogás, puede realizarse sobre todo por absorción en agua, en disoluciones básicas o de aminas o en disolventes orgánicos con base polietilenglicol. También se puede realizar por adsorción selectiva respecto a CH₄, o mediante membranas semipermeables, así como por reacción de CO₂ a CH₄ mediante H₂, o por asimilación fotosintética de algas. La calidad del biogás debe ser diferente según el uso, siendo más exigente para la introducción en la red (concentración de CO₂ menor a 2,5% v/v), que para motores de combustión interna generando electricidad.

El SH₂ aparece en todos los casos como parámetro importante, debiendo también considerarse las concentraciones de NH₃, siloxanos y halocarbonados. La eliminación de SH₂ puede realizarse sobre todo vía química; por adsorción y reacción con adsorbentes como Fe₂O₃, Fe(OH)₃ o ZnO, o por precipitación en el digestor añadiendo sales como FeCl₂ o FeCl₃. También se usan biofiltros aerobio o anóxico, oxidando el SH₂ o en cabeza de digestor microaerobio oxidando SH₂ a S.

VII.3.B. Otros procesos. Estabilización aerobia

La valorización de lodos de EDAR una vez que se prohíbe llevar a vertedero (1999/31/CE), puede pasar por uso agrícola, para lo que debe estabilizarse e higienizarse, sobre todo vía aerobia, en particular mediante el compostaje y la digestión

aerobia termófila autosostenida (ATAD). Esta última sólo tiene interés para EDAR de menos de 50000 habitantes, ya que por encima la digestión anaerobia suele ser más competitiva.

i.- Compostaje.

Se produce la humificación y mineralización de la materia orgánica, al tiempo que en la etapa termófila se elimina la mayoría de los patógenos. Dada su alta humedad se necesita un agente estructurante que la reduzca y mejore la estructura, con frecuencia otro residuo (co-compostaje) como poda o residuo agroindustrial. Además, es necesario un buen control para tener buen producto final, siguiendo la relación C/N, la velocidad de consumo de O₂, para reducir su acidez, y la concentración de metales, fitotóxicos y patógenos. Suele llevarse a cabo en pilas de unos pocos metros en las tres dimensiones en una operación discontinua y una agitación escasa y periódica. Resulta menos favorable que el compostaje de la fracción orgánica de residuales urbanos (FORSU).

ii.- Digestión aerobia termófila autosostenida.

Se procura elevar la temperatura a unos 65°C, introduciendo suficiente aire, generando CO₂, H₂O, higienizando, estabilizando parcialmente y reduciendo el volumen hasta un 40%. Se realiza con retirada y alimentación periódica de una fracción del volumen, manteniendo la estabilidad y con un tiempo de retención (TRH) de unos 7-10 días. Se opera con bajo consumo de energía, con buena calidad para cumplir la normativa de uso, debiéndose considerar que la lisis celular genera DQO soluble que se retorna a cabecera de la EDAR.

VII.4. EQUIPOS

i.- Concentración.

Se han presentado los equipos más importantes con lodos y los esquemas de algunos. Aquí se señalan algunas fotos de otros. En la Figura 39 como muestra del espesamiento, se señala un espesador de gravedad típico, y como ejemplo de eliminación mecánica una centrífuga horizontal.



Figura 39. Tanque de espesamiento, y centrífuga horizontal

ii.- Filtración.

Los sistemas de filtración permiten obtener las concentraciones de sólidos más elevadas excluyendo los procesos térmicos. Se muestran en la Figura 40 un filtro banda donde el lodo se va concentrando al ser comprimido entre dos telas, y una batería de filtros prensa.



Figura 40. Filtro banda. Filtro prensa

iii.- *Estabilización.*

En la Figura 41 se muestran fotografías de un digestor anaerobio, así como de un digestor aerobio y un sistema de compostaje, ya comentados anteriormente.



Figura 41. Digestor anaerobio. Digestor aerobio y planta de compostaje

VIII. EL VERTIDO DE AGUAS EN EL MEDIO NATURAL

VIII.1. VERTIDO EN EL SUELO

La aplicación en el **suelo** tiene la ventaja de su facilidad y su integración en el medio natural. Sin digestión se puede obtener alrededor de 0,1 kg de lodo por habitante día, pasando una parte importante de los componentes solubles, por ejemplo nitrógeno al agua al deshidratar. Las aplicaciones son diferentes en el caso de uso agrario, forestal o regeneración del terreno, variando a lo largo del año, y según las características del suelo, la vegetación o la presencia de tóxicos como metales. Existe normativa detallada de las características que se exigen en cada caso.

VIII.2. EL VERTIDO EN AGUAS DE LA NATURALEZA

i.- *General.*

Esta opción ha estado cada vez más controlada, al principio para mantener la vida en los ríos y en particular la pesca. Los diferentes impactos se pueden clasificar en efectos tóxicos *agudos* con duración de hasta algunas semanas (flotables, bacterias, O₂ disuelto, sólidos suspendidos) y efectos tóxicos a *largo plazo* (nutrientes, sólidos disueltos y otros tóxicos como metales). Un parámetro importante es el aumento de la temperatura sobre todo por vertidos de plantas térmicas, influyendo en la supervivencia de peces, así para salmones la temperatura media semanal debe ser menor de 20°C.

ii.- *Los vertidos en lagos.*

Pueden tener un impacto importante. Al aumentar nutrientes pueden pasar de oligotróficos a eutróficos, aumentando la biomasa, reduciéndose la biodiversidad, pudiendo detectarse por la desaparición de determinadas especies, o por el aumento de biomasa de algunas algas que provoca malos olores, con su muerte y deposición al fondo. En algunos casos se colocan elementos de aireación para mejorar la sostenibilidad biológica del medio, como burbujeadores o movimientos del agua que generen transferencia de O₂.

iii.- *En ríos.*

El impacto de descargas contaminantes ha sido tratado ampliamente de forma teórica. Los vertidos pueden ser puntuales o continuos (en escalón) dando lugar a una situación física análoga a la de procesos cromatográficos, sin o con reacción química, habiéndose difundido algunas soluciones matemáticas bien conocidas a partir de la ecuación de variación, sobre todo considerando forma de flujo pistón. La caída de concentración se debe a la dilución, y a transformaciones físicas, químicas y biológicas.

El componente más estudiado es el oxígeno, sobre todo cómo aumenta el déficit de O₂ a lo largo del río hasta un valor crítico a partir del cual se reduce debido a que la aireación supera al consumo. Ello modifica la composición biótica en el río. Por supuesto influye mucho la carga orgánica, los caudales (variables) y la turbulencia de la corriente, la fracción sedimentable, la presencia de algas, o entre otros factores el que se haya clorado el residuo, porque que retrasa la recuperación, además tener efecto tóxico en muchas especies. El paso de amoníaco a nitrito y nitrato consume una cantidad adicional de O₂, aumentando con la temperatura y el pH.

VIII.3. CARACTERÍSTICAS DEL IMPACTO

La materia orgánica se descompone sobre todo por bacterias, también con hongos y levaduras. Conviene considerar algunos de los problemas que suelen presentarse.

i. Dificultades propias del sistema. Así: a) El alejamiento entre nutrientes y microorganismos, a veces por no tener convección y tener sólo un fenómeno difusional; b) Las bajas concentraciones, que pueden requerir mayor energía para acercamiento; c) La presencia de sustratos grandes, que pueden ser difíciles si no se presentan enzimas, o se fijan en superficies; d) La posible presencia de sustratos difíciles o tóxicos.

ii. Posible impactos como: a) Eutrofización producida por el crecimiento de algas en presencia de nutrientes solubles b) Posibles inhibidores; c) Presencia de microorganismos que producen enfermedades, de residuos fecales, procedentes de alimentos o del agua o patógenos infecciosos.

iii. Debe considerarse la toxicidad sobre las aguas. Algunas propuestas recogidas en la normativa legal son medir la inhibición en organismos como *Daphnia* o *Photobacterium phosphoreum*. Hay mucho trabajo a realizar en la identificación

de la toxicidad, el tratamiento en origen y mejorar aspectos prácticos.

iv. Algunos problemas son bastante específicos. Así la contaminación de aguas marinas, sobre todo por lavado de sentinas o derrames incontrolados que tiene características especiales, así como los métodos de tratamiento

IX. EL TRATAMIENTO DE AGUAS ES UN SISTEMA INDUSTRIAL

IX.1. EQUIPOS AUXILIARES

Las plantas de tratamiento suelen colocarse en entornos amplios y cuidados con equipos principales conectados entre si y con otros auxiliares, como bombas, tuberías, sistemas eléctricos y de control, etc. (Figura 42). Por ejemplo, son frecuentes numerosos tanques de espera, en ocasiones tanques de emergencia, o almacenes de reactivos por ejemplo de tanques de cal. Una parte importante de la energía se consume en el bombeo y en los procesos de mezcla (además de la aireación).



Figura 42. Depósito y bomba para fangos

La necesidad de conocer la evolución de los contaminantes con diversas tecnologías ha hecho multiplicarse los trabajos de investigación. Son muy frecuentes los equipos de laboratorio, plantas piloto e incluso plantas con equipos integrados de tratamiento de aguas (Figura 43).



Figura 43. Lodos activos en laboratorio, y planta integrada modular

IX.2. SELECCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO

Habitualmente existen procesos en competencia, y dentro de ellos diferentes equipos posibles para realizar la función. La selección requiere experiencia, conocimientos globales y de las innovaciones recientes. Constituye un problema más complejo incluso que el diseño de un equipo previamente definido.

Algunos aspectos a considerar son:

- Experiencia previa en distintas tecnologías
- Necesidades de reactivos y energía, previsiones sociales y comerciales
- Evaluaciones ambientales
- Seguridad, calidad y trascendencia exterior
- Costes fijos y de operación (CAPEX y OPEX)
- Aspectos legales en las adjudicaciones y la seguridad.
- Finalmente, la normativa legal y perspectivas de evolución. Así, la Directiva 91/271/EEC, corregida varias veces, está pendiente de ser substituida por una nueva Directiva para el tratamiento de aguas residuales con importantes modificaciones por ejemplo en los límites de N o en el alcance al tamaño de poblaciones.

Al menos se requiere definir previamente las características de las aguas residuales y las exigencias al efluente, tener un diseño básico de los procesos y los costes aproximados de cada tecnología. En el caso de aguas residuales industriales suele tenerse menos conocimiento que en el caso de aguas urbanas, mucho más uniformes. Conviene tener alguna idea de la posibilidad de adaptación de la tecnología a las necesidades futuras, y conocer la sensibilidad de costes de las tecnologías a cambios de caudales, cargas, y tóxicos. Esto es diferente por ejemplo para cada operación, una precipitación o un tratamiento biológico, o por ejemplo si se opta por un biorreactor secuencial puede resultar más sencillo la adaptación a otras aguas.

IX.3. SISTEMAS DE CONTROL Y DIGITALIZACIÓN

i. Control.

Uno de los objetivos del control y la automatización es poder responder a las perturbaciones, frecuentes que se producen, para poder operar de forma estable en las condiciones deseadas. Los cambios de temperatura y concentraciones, tanto debido a cambios en el proceso como de las condiciones ambientales, son muy frecuentes desde las escalas horarias hasta la anual, por lo que en realidad se opera en régimen pseudo estacionario.

Hay muchas formas de actuación del control, cada vez más automáticas, incluyendo la introducción de la inteligencia artificial. La forma tradicional del control retroalimentado (Figura 44) es interesante para ver la forma en que funciona el control. En este sistema básicamente hay tres elementos. Los *sensores* que miden variables a la salida del tratamiento, comparándose su valor con el valor consigna obteniendo el valor de la perturbación. Este valor es procesado por el *controlador* que lo transforma en otra señal que hace actuar el *elemento final* (variable manipulada) sobre el propio proceso.

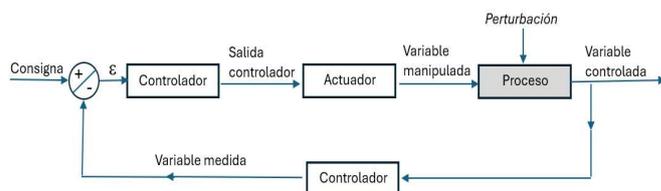


Figura 44. Esquema de un proceso tradicional de control con retroalimentación

Es muy importante disponer de sensores en línea que nos den valores de forma rápida y fiable, incrementando la digitalización. En las EDAR son frecuentes medidores de caudal, niveles, temperatura, turbidez, pH, redox, $O_{2,dis}$, materia orgánica, concentraciones (N_{tot} , NH_3 , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-}), producción de biogás, y cada vez más medidas de sedimentación, de lodos y de la actividad catalítica (velocidad de captación de O_2 , NH_3 , NO_3^-). Los controladores han pasado desde sistemas que aportaban modificaciones de la señal en forma proporcional, integral y derivada (PID), a otros mucho más complejos. Los actuadores son dispositivos como válvulas, bombas, compresores, de los que debe conocerse su eficiencia y flexibilidad

ii. Las comunicaciones.

Es un tema cada vez más importante que contribuye a la reducción de costes y que facilitan la integración de las plantas en sistemas más amplios, incluso de cuencas,

IX.4. CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO

La *explotación* busca obtener el máximo rendimiento de la instalación cumpliendo las eficacias requeridas en la normativa o el contrato, manteniendo las mejores condiciones de trabajo. Como otro proceso industrial, la operación de las plantas de tratamiento de agua precisa de las labores de conservación y mantenimiento adecuadas.

i.- La conservación.

Trata de reducir el envejecimiento de los elementos de la planta por la acción del medio, atmósferas, humedad, suciedad, y componentes fisicoquímicos y biológicos. Se debe extender a los elementos en uso y a los que están en la reserva, incluyendo no sólo la limpieza si no también la reducción del ensuciamiento.

ii.- El mantenimiento.

Pretende que todos los elementos, instalaciones, aparatos,... estén en condiciones adecuadas de uso o funcionamiento, lo cual no es fácil en instalaciones que operan día y noche durante años en condiciones agresivas. Se suele hablar de mantenimiento preventivo, predictivo y modificativo. El *preventivo* pretende mantener las condiciones del buen funcionamiento, por ejemplo, mediante engrases y mantenimientos mecánico y eléctrico. Incluye la vigilancia e inspección y la revisión de elementos importantes de forma periódica. El mantenimiento *predictivo* pretende conocer el estado de un equipo a partir de los parámetros disponibles. El mantenimiento *modificativo* consiste en introducir mejoras en la fiabilidad y/o rendimiento de los equipos. A la resolución de averías se le llama en ocasiones mantenimiento correctivo.

IX.5. HIGIENE Y SEGURIDAD

Los riesgos en las plantas de tratamiento de agua con operación continua en presencia de agua, electricidad, compuestos y gases tóxicos son complejos tanto en higiene como en seguridad. Se señalan algunas consideraciones básicas.

i.- Higiene.

Se pretende proteger la salud de los trabajadores y descendientes. Un tema importante es conocer los riesgos de *toxicidad* de los compuestos químicos. En particular en la UE los valores límite ambientales (VLA), para exposición diaria, de corta duración y los límites de desviación, así como los valores límite biológicos. Otro problema importante es *el ruido*. Se caracteriza por el nivel sonoro (que se mide habitualmente en decibelios dB) y la frecuencia. Puede generar hipoacusia, pérdida de audición y sordera profesional, influyendo también en ello la sensibilidad del receptor. Para su control se puede actuar en la fuente sonora, en el medio (apantallamiento y absorción) o en el receptor con equipos de protección individual (EPI) como protectores auditivos y limitando el tiempo de exposición.

ii.- La Seguridad.

Se ocupa de un buen número de posibles eventos en las plantas de tratamiento de aguas. *Los incendios* por la combustión son reacciones de oxidación muy exotérmicas entre combustible y comburente (habitualmente oxígeno/aire), con un foco de ignición, generando humos, altas temperaturas y residuos. *Las explosiones* son aumentos bruscos y violentos del volumen de una sustancia (aire, vapor, gases de combustión) en un medio que ofrece resistencia a ese aumento, en recipiente cerrado o al aire libre. Pueden ser por reacciones químicas, físicas (rotura de recipientes a presión, o cambios en P o T), eléctricas (arco eléctrico y vaporizaciones...), entre otros. El *riesgo eléctrico*, es muy importante sobre el cuerpo humano. Para el paso de corriente eléctrica a su través se precisa un contacto con una fase activa, con carcassas accidentalmente, o por contacto indirecto.

El análisis de los riesgos. Constituye la base de estudio de los eventos a evitar. El riesgo es el producto de la probabilidad por el daño que se produce. Se suelen considerar tres escalas:

- La identificación* debe ser lo más exhaustiva posible para lo que se dispone de códigos, listas de comprobación, modalidades de fallo y sus efectos. Pero sobre todo se ha extendido el análisis de peligros y operabilidad (HAZOP). Consiste en preguntar mediante unas palabras-guía y averiguar la posibilidad de que una causa particular lleve a una situación peligrosa. Este análisis puede conducir a modificaciones en el diseño.
- Cuantificar la *probabilidad del riesgo* por ejemplo con árboles de fallos o de sucesos a partir de las probabilidades de acontecimientos simples, extendiéndolos a la instalación.
- Consecuencias del riesgo*, son modelos, ecuaciones, que dan directamente la relación entre la causa y las consecuencias por ejemplo para quemaduras.

IX.6. EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

La *evaluación de impacto ambiental* EIA surge en Estados Unidos como norma a partir de 1969, y se ha extendido como requerimiento para la aprobación de proyectos industriales, así

como su seguimiento periódico posterior. En el caso de las plantas de tratamiento de aguas se tienen impactos relacionados con la ocupación del suelo, el uso de recursos naturales, el consumo de energía, la generación de productos finales, y las emisiones a la atmósfera y al agua.

Otro enfoque reciente adicional pretende evaluar los impactos integrales de las plantas, que deberán ser inferiores a evitar su colocación, y que se realiza mediante el *Análisis de Ciclo de Vida* (ACV). La diferencia entre beneficios de la remediación e impacto de la EDAR es el beneficio ambiental (BAN) que debe ser positivo. El ACV implica la compilación de entradas y salida de materiales, energía y residuos, así como su procedencia y destino final. Según la metodología (ISO 14040) implica cuatro fases: Definir alcance y objetivos; realizar el inventario; el análisis de impacto, y finalmente su interpretación. En el tratamiento de aguas residuales los impactos, o categorías más descritas son la eutrofización, el calentamiento global, y los impactos de toxicidad.

IX.7. SELECCIÓN DE EQUIPOS

Aunque existen datos en la bibliografía sobre la selección de equipos, la realidad es que se suele recurrir a empresas especializadas, como consultores especialistas, fabricantes o suministradores de equipos. La correcta definición influye en la calidad del agua, la forma de gestión, los costes de explotación y otros temas de interés, como el mantenimiento. Suele haber varias soluciones para un requerimiento, por ejemplo, tamices de tornillo y rototamices para pretratamiento y después muchas alternativas para cada equipo.

Se suelen diferenciar por un lado los equipos mecánicos y su instrumentación, y por otro lado los de automatización y control. También se suelen clasificar en equipos de comercio (ya fabricados) y equipos de calderería y manufacturados (se fabrican en talleres de forma específica). Algunas recomendaciones básicas al seleccionar los equipos son: a) Mejor equipos comerciales de fácil sustitución, b) Preferencia por equipos modulables o intercambiables, c) Buenos equipos de reserva, por ejemplo 1 de reserva por 1 o 2 operando, d) Materiales de buena calidad.

La selección de equipos suele hacerse en un proceso evolutivo yendo de definiciones generales a específicas. Por ejemplo: (a) se requiere una bomba para cierta función, (b) del tipo sumergible, (c) de pozo de bombeo a depósito elevado, (d) ver la curva del sistema, (e) tipología, materiales, curvas, accionamiento, tipo y marca.

Debe mencionarse también la importancia de la elección de la **implantación (layout)** en el terreno disponible. La forma en que se colocan los equipos, aprovechando la gravedad, facilitando el movimiento de materiales internamente, así como desde o hacia el exterior, resulta una muy importante para poder asegurar que vayamos a tener después una operación eficiente.

IX.8. OPERACIÓN DE LA PLANTA. COSTES

En una EDAR los costes de operación son elevados, y entre ellos los costes de energía y personal (35 y 31%) son los principales, seguidos de un 16% para residuos, reactivos 6%, mantenimiento 6% y varios 4%. Como información general, siendo conscientes de su variabilidad y evolución, se señalan en este epígrafe algunos datos recientes de Acciona en explotación convencional. Esta información puede indicarnos que aspectos atender preferentemente. Con altos caudales y costes, los pequeños ahorros por m³ tratado pueden marcar el límite de la competitividad.

Se suele mencionar en primer lugar los costes **fijos** que no varían en el corto plazo con la cantidad de agua procesada. Son por ejemplo los sueldos, término de potencia de electricidad, casi todo el mantenimiento, administración, seguros, alquileres. En segundo lugar, los costes **variables** que cambian a corto plazo con la producción, se incluyen aquí la energía consumida, el coste de residuos y de reactivos.

Los más importantes son:

- i. Los gastos de **energía** son los principales, sobre todo los del tratamiento biológico 44% (aireación), terciario 22%, desodorización 13%, pretratamiento 13% y fangos 8%. Los costes energéticos pueden aumentar considerablemente si se someten a procesos de hidrólisis para mejorar la biodegradabilidad y producción de biogás. El retorno de la línea de fangos contiene una alta concentración de N (un 20% del total de entrada) resultando interesante opciones como el proceso Anammox, que aumenta los fangos en el digestor anaeróbico aunque también los costes.
- ii. Los gastos de **personal** suelen ser el segundo valor, incluyen los de explotación, mantenimiento, laboratorio, administración y externos. Sus necesidades podrían reducirse en las instalaciones en el futuro por la introducción de la tecnología digital e integración en la red.
- iii. Los costes de **reactivos** son diversos. En la línea de agua, polielectrolito (aniónico), coagulantes como sulfato de aluminio, cloruro férrico, o hipoclorito sódico. En la línea de fangos polielectrolito catiónico (p.ej. 6g/kg MS) y cal, para desodorización NaOH, NaClO y carbón activo.
- iv. Los **fangos** tienen costes de tratamiento importantes, así en el pretratamiento se generan unos 0,07 kg/m³ con un coste de unos 60 €/t. Los lodos totales producidos, incluso considerando una producción por persona de 60 gMS/día, pueden variar entre 0,15 y 0,70 kgMS/d. La gestión más barata puede ser la aplicación en agricultura unos 15 €/t, y hasta 60 €/t en vertedero, al menos.

Finalmente conviene señalar la importancia de los contratos y los tipos de gestión (por ejemplo, pública, privada o mixta), lo que requiere un conocimiento financiero básico, en particular del Plan General de Contabilidad que fija los procedimientos en el registro de la actividad económica de la empresa.

X. UTILIZACIÓN Y PERSPECTIVAS FUTURAS

X.1. UTILIZACIÓN

X.1.A. *El uso del agua posible*

El Real Decreto 1620/2007 estableció el régimen jurídico para la reutilización de aguas residuales de EDAR, con el objetivo de convertir el agua depurada en agua reutilizada. Se señalaban los diferentes tipos de agua regenerada (urbana, agrícola, industrial) con una serie de requisitos (sólidos en suspensión, turbidez, concentración de algunos iones y microbiología,...), según el agua de origen y el uso. El RD 4/2023 de 11 mayo introduce un nuevo marco para la reutilización de aguas. Las operaciones que suele requerir la etapa final de tratamiento son coagulación/floculación, sedimentación/ filtración, desinfección y electrodiálisis, u ósmosis si se requiere bajar la conductividad a partir de aguas salobres o salinas.

España es el país europeo que más agua reutiliza, entre el 8 y 14% del agua residual tratada, unos 0,4 Gm³ al año, sobre todo en Valencia y Murcia. El uso principal es el riego para uso agrario más del 65%, pero también se ha usado para usos municipales (riego zonas verdes, limpieza de calles), recreativos como campos de golf e industriales, creciendo el uso ambiental como mantenimiento de humedales o recarga de acuíferos o para mejorar el caudal ecológico de ríos.

El uso para procesos industriales ha comenzado a aplicarse en particular para sistemas de refrigeración, para limpieza, o el uso más exigente para proceso o para calderas. En plantas con buen sistema de tratamiento terciario, la incorporación de osmosis inversa permite obtener agua por ejemplo por debajo de 20 mS/cm.

X.1.B. *El uso de los lodos*

Los lodos producidos de forma continua son un residuo (código LER 190805), por lo que inicialmente se trata de gestionarlos según la jerarquía de gestión de residuos. En Asturias la producción de lodos en las EDAR es al menos de alrededor de 3500 t MS/año, en España del orden de 10⁶ tMS/año (MAPAMA 2012). Para las EDAR de más de 50000 habitantes se usa sobre todo digestión anaerobia, constituyendo más del 50% de los lodos generados.

En los propios tratamientos en planta, con digestión anaerobia, el proceso habitual es la producción de energía, seguido del centrifugado dando un diluido para tratamiento o reciclado al tratamiento de aguas y un espesado a evacuación. La gestión integrada procura utilizar la energía en la planta y el aprovechamiento de N, P y de biosólidos. Las líneas y objetivos más difundidos son reducir los costes de gestión, obtener biosólidos sin patógenos, mejorar la deshidratabilidad para reducir costes en evacuación, así como mejorar la productividad de biogás y su utilización. Respecto al destino final, más del 80% de los lodos se dedican a suelo agrícola, y un 7 % a otras aplicaciones a suelo. El plan de residuos PEAR 16-22

marcaba valorizar más del 85%, llevar un máximo de 7% a vertedero, y quedaba el resto para incinerar o coincinerar (ampliado en 2023). Se comentan a continuación estos usos.

i.- *Uso como fertilizante.*

El uso de fangos para agricultura permite ahorrar alrededor del 10% de fertilizantes químicos convencionales. Sólo está permitido para depuradoras de aguas residuales urbanas, fosas sépticas domésticas y depuradoras de agroindustria, no para industriales. Ello siempre después de un adecuado tratamiento y control, en particular de contaminantes y patógenos y sobre todo metales que no se degradan y que pueden acumularse en el suelo y avanzar en las cadenas tróficas. Como referencia, una composición media de lodos de depuradora para uso agrario es: materia orgánica 50-80%, Nitrógeno 2-6%, P₂O₅ 2-5%, Potasio 0,5-1%, pH 6-12, conductividad eléctrica 1-11 dS/m. Puede verse el BOE (nº142, de 14-06 2013) sobre la utilización de lodos de depuradora en el sector agrario. En Asturias la gestión principal la realiza Cogersa. En la normativa de la UE se prevén cupos obligatorios de recuperación de nutrientes (N, P,...) a partir de residuos.

Para su aplicación agrícola debe controlarse el contenido de patógenos en los lodos. En la UE ya la ley (86/278/EEC) señalaba que deben ser tratados para reducir la transmisión de enfermedades. La US.EPA establece según la calidad microbiológica, lodos tipo A que pueden ser usados sin restricciones, y los de tipo B con algunas restricciones para su aplicación. La inactivación puede ser química/biológica o la más frecuente térmica en que la combinación tiempo-temperatura define el proceso en forma análoga a la pasteurización o esterilización. Para tener una idea inicial para el tipo A puede requerirse alrededor de 1 día a 60°C o 2 h a 70°C, empeorando apreciablemente la transmisión de calor al aumentar la concentración de sólidos

ii.- *Uso energético.*

El lodo puede transformarse en biogás, energía, pudiendo aprovecharse para combustión in situ, o para introducir en las tuberías de gas después de un cuidadoso proceso de depuración. Un informe del Ministerio de Transición Ecológica (2020) indicaba que el potencial de generación de energía por biogás es de 1023 GW.h, mucho menor que la de los residuos de base sólida, municipales 2524, agroalimentación 3413 y sobre todo agricultura y ganadería (11363 y 14090 promedio respectivamente). El potencial total serían 32413 GW (de los cuales sólo el 3% de lodos). El aprovechamiento energético puede hacerse por combustión in situ, o introducir en redes previa purificación

X.2. PENSANDO EN EL FUTURO

X.2.A. *Las exigencias sociales*

A la hora de evaluar las alternativas de futuro podemos comenzar con la mención habitual a la importancia de la *economía circular*. Por un lado, es muy general la adhesión a la necesidad de su implantación, y también lo es plantear las

dificultades en la aceptación legal y comercial de los productos reciclados. Quizás debemos empezar por reconocer que tanto el sector industrial como el doméstico han recuperado los materiales rentables económicamente dentro de la normativa legal. Es decir, hasta el presente la economía no era lineal, si no menos circular de lo que ahora pretendemos. Hacerlo ahora más circular precisa más restricciones legales y mayores acciones económicas incentivando económicamente a los sujetos activos que carguen con esos sacrificios. Quizás los productos comerciales resulten “diferentes” en su aceptación social. Bajo el punto de vista ingenieril, la complejidad de la composición implica también una mayor dificultad de los procesos de separación.

X.2.B. *Perspectivas para la fase acuosa*

Puede esperarse que se aumente el amplio uso tradicional para riego, mayoritario en algunas comunidades mediterráneas. Se podrá requerir agua de calidad específica creciente, aprovechando nutrientes y recuperando energía en el proceso. También podría expandirse el uso del agua regenerada para consumo humano.

El uso en la industria del agua residual tratada deberá ir creciendo, considerando los problemas de sequía y su reducida aceptación en otros posibles usos. Hay algunos ejemplos en España, así en polígonos industriales como en el químico de Tarragona. Otro ejemplo es el uso del agua de una depuradora (Villapérez) tratando su efluente con ósmosis inversa hasta una conductividad de unos 6 mS/cm, seguido de bombeo a depósitos y regulación de dilución para uso en calderas o torres de refrigeración. Nuevas necesidades como el agua para la producción de H₂ (unos 25 litros por kg de H₂ producido) pueden añadir perspectivas de aprovechamiento difíciles de prever.

X.2.C. *Imaginando un futuro para el lodo*

El aprovechamiento de estruvita (fosfato de amonio y magnesio hidratado) es una alternativa bien estudiada que puede producirse ya en cantidades de t/día. El proceso básicamente consiste en recuperarlo por cristalización en la fracción líquida del fango una vez liberado el P como ortofosfato en condiciones anaerobias. Debe regularse el pH (8-10) por ejemplo con CO₂, y puede exigirse la adición de Mg para aprovechar mejor los macronutrientes, cuidando muy en particular excluir metales pesados en los cristales de estruvita. Para la comercialización debe clasificarse la estruvita como fertilizante y no como residuo. Otro producto de interés de fósforo es la vivianita Fe₃PO₄·8H₂O. El ahorro energético en las plantas seguirá siendo importante así como la producción de bioenergía en particular para uso interno en la planta o en codigestión con otros residuos.

Seamos utópicos. Pensemos en el aprovechamiento no energético de la materia orgánica. La energía libre de Gibbs ($\Delta G^{\circ} = \Delta H^{\circ} - T\Delta S^{\circ}$) es el máximo trabajo reversible que puede obtenerse de un sistema cerrado (P y T constantes). La condición para espontaneidad a P y T constantes es que G^o se reduzca, aunque puede ocurrir que su cinética sea muy lenta (alta energía de activación) y que no ocurra prácticamente. Es así la

máxima energía aprovechable por una reacción química. En la Tabla 3 puede verse el valor estándar en algunos compuestos en condiciones normales con el dióxido de carbono (CO₂) en la parte más baja, con la menor energía disponible. Los procesos de producción de energía por combustión suelen conducir al CO₂ por degradación de compuestos en forma lineal, no reversible, lejos de objetivos de circularidad.

Tabla 3. Energías libres (de Gibbs) estándar de algunos compuestos (condiciones normales)

Compuesto	G°, kJ/mol	Compuesto	G°, kJ/mol
Acetileno	209,9	Peróxido de hidrógeno (l)	-137,2
Ozono	142,7	Monóxido de carbono	-137,2
Benceno	124,4	Metanol	-166,4
N-hexano	35,0	Etanol	-174,8
Oxígeno	0	Agua vapor	-228,6
Carbono grafito	0	Agua líquida	-237,1
Amoniaco	-16,5	Dióxido de azufre	-300,0
Propano	-24,4	Cloruro sódico	-384,1
Etano	-32,9	Dióxido de Carbono	-394,4
Metano	-50,8	Carbonato cálcico	-1128,8

Adicionalmente, el CO₂ con su alta absorbancia para radiación procedente de baja temperatura, es uno de los elementos clave entre los gases de efecto invernadero GEI, junto a otros gases relevantes en el tratamiento de aguas, como el metano, los óxidos de nitrógeno e incluso el propio vapor de agua. Los procesos que generen CO₂ deben pagar una cuota por tonelada emitida, actualmente entre 20 y 100 €/t CO₂, variable según mercado de emisiones (la media anual en el año 2023 fue 83,5€).

Los procesos de crecimiento biológico dan lugar a productos más elevados en la escala de G^o mientras la producción de energía por combustión conduce a CO₂ y por tanto a la no circularidad. En una situación futura, a largo plazo, si la energía se pretende obtener sin combustión, con fuentes solar y eólica, la alternativa para la materia orgánica de los lodos sería la separación y obtención de productos químicos de los lodos. Así se ha propuesto aprovechar materiales inorgánicos como N, P, también metales pesados y materiales orgánicos como proteínas, ácidos orgánicos de cadena corta, polímeros extracelulares análogos a alginato (ALE), hormonas de crecimiento vegetal, o el aprovechamiento de residuo sólido como biocarbón.

a. Una vía es la separación directa que sea posible de compuestos. Un posible desarrollo futuro de procesos de separación más intensos podría cambiar la estructura actual de los tratamientos biológicos y los aprovechamientos de los considerados “contaminantes”.

b. Otro camino es aprovechar los compuestos de las bacterias del tratamiento biológico, previa rotura celular liberando compuestos que puedan ser aprovechados después. Ello podría requerir:

- i. La rotura celular, la hidrólisis, puede realizarse mediante varias alternativas, hidrólisis térmica, cambio de presión, ultrasonidos, tensioactivos, entre otros
- ii. La separación de los componentes plantea múltiples alternativas, abiertas a distintos productos de interés en

cada momento según el grado de hidrólisis realizado. Las operaciones habituales utilizan precipitaciones, membranas, y separaciones en columna

- iii. Utilización de materiales. Resulta difícil conseguir usos para los productos separados debido a la dificultad de tener productos de suficiente pureza y uniformidad para su comercialización, además de dar la confianza suficiente
- iv. Aprovechamiento del resto. Es imposible no tener algún residuo, llegar a cero. Una opción razonable podría ser volver a someterlo al poder regenerador de microorganismos y utilizarlo como medio de fermentación, por ejemplo, para la producción de biopolímeros o de enzimas.

Debemos también resaltar que la etapa más importante es la evaluación global, no sólo de productos si no de valoración y aceptación en el mercado. Se puede asumir que una vez se opte por determinada tecnología, su desarrollo conllevará muchas mejoras futuras y quizás ahorros económicos.

X.3. LO QUE VAYA A PASAR

Se comentan finalmente algunos aspectos generales de posible impacto en las alternativas mencionadas a largo plazo

- *El agua y la energía.* Ya se ha comentado la conexión entre la disponibilidad de uno y su impacto en la otra. A corto plazo uno de los retos principales es la mejora de la eficiencia energética generándola en alta o en baja, o en el tratamiento y secado de lodos e incluyendo la generación de energía renovable en los propios terrenos e infraestructuras.
- *La evolución de la economía.* Puede clarificar en cada momento lo que puede asumirse, con la actualización de los capítulos económicos mencionados anteriormente. La evolución de la utilización de energía solar y eólica resultarán importantes
- *Las perspectivas de sostenibilidad.* La reducción de residuos o la tendencia a la circularidad va desde el aprovechamiento como fertilizantes hasta la posibilidad de Biorrefinería. Valorizar los subproductos son objetivos para contribuir a la Estrategia Española de Economía Circular y la Bioeconomía. Su desarrollo cambia al hacerlo aspectos como el marco normativo, o el reconocimiento como productos de los subproductos de las plantas de tratamiento y promover su uso comercial.

«Quiero volver a tierras niñas;
llévenme a un blando país de aguas.
En grandes pastos envejezca
y haga al río fábula y fábula...»
Agua – fragmento –, Gabriela Mistral



AGRADECIMIENTOS

A mis alumnos y a mis maestros
A Cadasa por proveer las fotos presentadas aquí. Pueden verse otros esquemas en <https://consorcioaa.com/wp-content/uploads/2018/03/villaperez-montaje.pdf>
Al Prof. Daniel Prats por la corrección de este capítulo.

REFERENCIAS, BIBLIOGRAFÍA Y ENLACES

Algunas normativas

- UE: Directiva Marco del Agua
https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/aguas-superficiales/concepto-estado/textos_legislativos.html
- España: Código de Aguas Normativa Estatal
https://www.boe.es/biblioteca_juridica/codigos/codigo.php?id=32&modo=2¬a=0&tab=2c
- Residuos y Suelos contaminados para una economía circular (Ley 7/2022, BOE 9-04-2022)
<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-5809>

Algunos libros bastante completos sobre tratamiento de aguas

- Henze, M., van Loosdrecht, M.C.M., Ekama, G.A. and Brdjanovic, D. (2017). *Tratamiento Biológico de Aguas Residuales*. IWA Publishing, London.
- Metcalf & Eddy (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales*. 3ª Edición, McGraw-Hill, Barcelona.
- Patterson, J.W. (1985). *Industrial Wastewater Treatment Technology*. 2ª Edición. Butterworth-Heinemann, Oxford.

Por motivos personales, he utilizado aquí de forma importante dos referencias

- Díaz, M. (2021). *Ingeniería de Bioprocesos*. 3ª Edición. Ediciones Paraninfo, Madrid.
- Díaz, M. (2018). *Ecuaciones y Cálculos para el Tratamiento de Aguas*. Ediciones Paraninfo, Madrid.

Existe en la red mucha información sobre los temas aquí tratados, incluyendo videos.