

# CAPÍTULO 1: EL AGUA

Según la Real Academia Española, el agua (del latín *aqua*) es la "sustancia formada por la combinación de un volumen de oxígeno y dos de hidrógeno, líquida, inodora, insípida, en pequeña cantidad incolora y verdosa o azulada en grandes masas. Es el componente más abundante en la superficie terrestre y más o menos puro, forma la lluvia, las fuentes, los ríos y los mares; es parte constituyente de todos los organismos vivos y aparece en compuestos naturales, y como agua de cristalización en muchos cristales". Pero cabe señalar que desde el punto de vista científico, esta definición no tiene en cuenta los isótopos de hidrógeno y oxígeno, existiendo de esta forma, junto a la forma esencial del agua,  $H_2O$ , el agua pesada,  $D_2O$ , el agua hiperpesada,  $T_2O$  y el agua semipesada HDO. A esto hay que añadir también la existencia de tres isótopos del oxígeno,  $O^{16}$ ,  $O^{17}$  y  $O^{18}$ , y tres isótopos del hidrógeno,  $H^1$ ,  $H^2$  o D (Deuterio) y  $H^3$  o T (Tritio) con lo que el líquido que comúnmente llamamos agua se trata de una mezcla de 18 cuerpos posibles, aunque en la práctica sea una mezcla de agua ligera ( $H_2O$ ) y de muy pequeñas cantidades de agua pesada y agua hiperpesada.

El agua es considerada como uno de los recursos naturales más fundamentales para el desarrollo de la vida, y junto con el aire, la tierra y la energía, constituye los cuatro recursos básicos en que se apoya el desarrollo.

Como hemos comentado, es el compuesto más abundante, cubriendo las tres cuartas partes de la superficie terrestre. Sin embargo, diversos factores limitan la disponibilidad de agua para uso humano, dejando de lado en este trabajo los factores económicos, sociales y políticos. Se sabe que más del 97 % del agua total del planeta se encuentra en los océanos y otras masas salinas y que podemos considerarla como inservible, ya que apenas están disponibles para ningún propósito. Del 3 % restante, un 2,38 % aproximadamente, se encuentra en estado sólido, resultando prácticamente inaccesible. El resto, un 0,62 %, se encuentra en ríos, lagos y aguas subterráneas. Como apreciamos, la cantidad disponible de agua es verdaderamente escasa, aunque mayor es el problema de la distribución irregular en el planeta.

El agua, como recurso natural, es manipulada por el hombre, alterando así su ciclo. El agua se extrae de los ecosistemas para su utilización. Pero un mayor suministro de agua significa una mayor carga de aguas residuales, lo que altera la vegetación y la calidad posterior en su vertido. Es aquí donde hay que dejar

constancia de la importancia del desarrollo sostenible, que es aquel que permite compatibilizar el uso de los recursos con la conservación de los ecosistemas.

## 1.1. Propiedades fisicoquímicas

Sin duda alguna, el agua es uno de los elementos más importantes desde el punto de vista fisicoquímico, hasta tal punto que sus temperaturas de transformación de un estado a otro han sido tomadas como puntos fijos, a pesar de que su punto de congelación y ebullición sean anormales, debido a las asociaciones moleculares.

A temperatura ambiente, el agua pura es inodora, insípida e incolora, aunque adquiere una leve tonalidad azul en grandes volúmenes, debido a la refracción de la luz al atravesarla, ya que absorbe con mayor facilidad las longitudes de onda larga (rojo, amarillo, naranja) que las longitudes de onda corta (azul, violeta), desviando lentamente estas otras, provocando que en grandes cantidades de agua esas ondas cortas se hagan apreciables.

Su importancia reside en que casi la totalidad de los procesos químicos que suceden en la naturaleza, no solo en organismos vivos sino también en la superficie no organizada de la tierra, así como los que se llevan a cabo en la industria tienen lugar entre sustancias disueltas en agua.

Henry Cavendish<sup>1</sup> descubrió en 1781 que el agua es una sustancia compuesta y no un elemento. Estos resultados fueron anunciados por Antoine - Laurent de Lavoisier (1743 - 1794) en la Academia Francesa en 1783, dando a conocer que el agua estaba formada por oxígeno e hidrógeno. En 1804, el químico francés Joseph Louis Gay-Lussac (1778 - 1794) y el naturalista y geógrafo alemán Alexander von Humboldt (1769 - 1859) publicaron un documento científico que demostraba que el agua estaba formada por dos volúmenes de hidrógeno por cada volumen de oxígeno (H<sub>2</sub>O).

Entre las moléculas de agua se establecen enlaces por puentes de hidrógeno debido a la formación de dipolos electrostáticos que se originan al situarse un átomo de hidrógeno entre dos átomos más electronegativos, en este caso de oxígeno. El oxígeno, al ser más electronegativo que el hidrógeno, atrae más los electrones compartidos en los enlaces covalentes con el hidrógeno, cargándose negativamente, mientras los átomos de hidrógeno se cargan positivamente, estableciéndose así dipolos eléctricos. Los enlaces por puentes de hidrógeno son enlaces por fuerzas de van der Waals de gran magnitud, aunque son unas 20 veces más débiles que los enlaces covalentes.

Los enlaces por puentes de hidrógeno entre las moléculas del agua pura son responsables de la dilatación del agua al solidificarse, es decir, su disminución de densidad cuando se congela.

---

<sup>1</sup> Henry Cavendish (1731 - 1810). Físico y químico británicos de padres británicos pertenecientes a la nobleza inglesa. Su trabajo más célebre fue el descubrimiento de la composición del agua. Afirmaba que "el agua está compuesta por aire desflorigastado (oxígeno) unido al flogisto (hidrógeno)".

En estado sólido, las moléculas de agua se ordenan formando tetraedros, situándose en el centro de cada tetraedro un átomo de oxígeno y en los vértices dos átomos de hidrógeno de la misma molécula y otros dos átomos de hidrógeno de otras moléculas que se enlazan electrostáticamente por puentes de hidrógeno con el átomo de oxígeno.

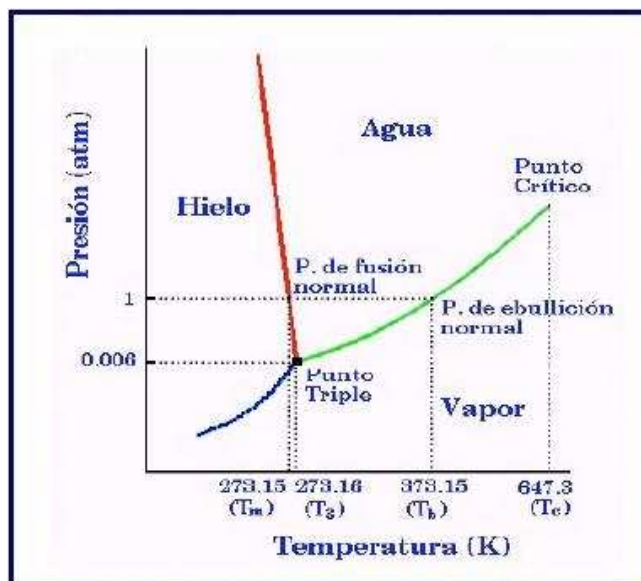
El hielo representa seis formas alotrópicas, en las que una sola, el hielo ordinario, es más ligero que el agua sólida. Esta estructura cristalina es muy abierta y poco compacta, menos densa que en estado líquido. El agua tiene una densidad máxima de 1 g/cm<sup>3</sup> cuando está a una temperatura de 3,8 °C, característica especialmente importante en la naturaleza que hace posible el mantenimiento de la vida en medios acuáticos sometidos a condiciones exteriores de bajas temperaturas.

La dilatación del agua al solidificarse también tiene efectos importantes en los procesos geológicos de erosión. Al introducirse agua en grietas del suelo y congelarse posteriormente, se originan tensiones que rompen las rocas.

### *1.1.1. Densidad*

La densidad del agua líquida es altamente estable y varía poco con los cambios de temperatura y presión. A presión normal de 1 atmósfera, el agua líquida tiene una mínima densidad a 100 °C, cuyo valor aproximado es 0,958 Kg/l. Mientras baja la temperatura va aumentando la densidad de manera constante hasta llegar a los 3,8 °C donde alcanza una densidad de 1 Kg/l. Esta temperatura representa un punto de inflexión y es cuando alcanza su máxima densidad a presión normal. A partir de este punto, al bajar la temperatura, disminuye la densidad aunque muy lentamente hasta que a los 0 °C alcanza 0,9999 Kg/l. Cuando pasa al estado sólido ocurre una brusca disminución de la densidad, pasando a 0,917 Kg/l.

Por tanto, la viscosidad, contrariamente a lo que pasa con otros líquidos, disminuye cuando aumenta la presión. Como consecuencia, el agua se expande al solidificarse. En la siguiente imagen vemos el diagrama de fases del agua, donde podemos diferenciar gráficamente lo aquí comentado.



**Figura 1.** Diagrama de fases del agua.

### 1.1.2. Disolvente

El agua es un disolvente polar. Como tal, disuelve bien sustancias iónicas y polares; no disuelve apreciablemente sustancias fuertemente apolares, como el azufre en la mayoría de sus formas, y es inmisible con disolventes apolares, como el hexano. Esta propiedad es de gran importancia para la vida.

La propiedad de ser considerada casi el disolvente universal por excelencia se debe a su capacidad para formar puentes de hidrógeno con otras sustancias que pueden presentar grupos polares, o con carga iónica, como alcoholes, azúcares con grupos R-OH, aminoácidos y proteínas con grupos que presentan cargas + y -, dando lugar a disoluciones moleculares. También las moléculas de agua pueden disolver sustancias salinas que se disocian formando disoluciones iónicas.

En las disoluciones iónicas, los iones de las sales son atraídos por los dipolos del agua, quedando "atrapados" y recubiertos de moléculas de agua en forma de iones hidratados o solvatados.

Algunas sustancias, sin embargo, no se mezclan bien con el agua, incluyendo aceites y otras sustancias hidrofóbicas. Membranas celulares compuestas de lípidos y proteínas, aprovechan de esta propiedad para controlar las interacciones entre sus contenidos químicos y los externos. Esto se facilita en parte por la tensión superficial del agua.

La capacidad disolvente es responsable de las funciones metabólicas, ya que en los seres vivos, existe una corriente de agua que pasa a través del cuerpo y que constituye el medio imprescindible para realizar las operaciones organobiológicas, y transportar las sustancias de los organismos.

### 1.1.3. Polaridad

La molécula de agua es muy dipolar. Los núcleos de oxígeno son muchos más electronegativos (atraen más los electrones) que los de hidrógeno, lo que dota a los dos enlaces de una fuerte polaridad eléctrica, con un exceso de carga negativa del lado del oxígeno, y de carga positiva del lado de los hidrógenos.

Los dos enlaces no están opuestos, sino que forman un ángulo de  $104,45^\circ$  debido a la hibridación  $sp^3$  del átomo de oxígeno, así que en conjunto los tres átomos forman con un triángulo, cargado negativamente en el vértice formado por el oxígeno, y positivamente en el lado opuesto, el de los hidrógenos. Este hecho es de gran importancia, ya que permite que tengan lugar los enlaces o puentes de hidrógeno mediante el cual las moléculas de agua se atraen fuertemente, adhiriéndose por donde son opuestas las cargas.

El hecho de que las moléculas de agua se adhieran electrostáticamente, a su vez modifica muchas propiedades importantes de la sustancia que llamamos agua, como la viscosidad dinámica, que es muy grande, las temperaturas de fusión y ebullición o los calores de fusión y vaporización, que se asemejan a los de sustancias de mayor masa molecular.

#### *1.1.4. Cohesión*

La cohesión es la propiedad con la que las moléculas de agua se atraen a sí mismas, por lo que se forman cuerpos de agua adherida a sí misma, las gotas.

Los puentes de hidrógeno mantienen las moléculas de agua unidas, formando una estructura compacta que la convierte en un líquido casi incompresible. Estos puentes se pueden romper fácilmente con la llegada de otra molécula con un polo negativo o positivo dependiendo de la molécula, o con el calor.

#### *1.1.5. Adhesión*

El agua, por su gran potencial de polaridad, cuenta con la propiedad de la adhesión, es decir, el agua generalmente es atraída y se mantiene adherida a otras superficies, lo que se conoce comúnmente como "mojar".

Esta fuerza está también en relación con los puentes de hidrógeno que se establecen entre las moléculas de agua y otras moléculas polares y es responsable, junto con la cohesión, del llamado fenómeno de la capilaridad.

#### *1.1.6. Capilaridad*

El agua cuenta con la propiedad de la capilaridad, que es la propiedad de ascenso, o descenso, de un líquido dentro de un tubo capilar. Esto se debe a sus propiedades de adhesión y cohesión.

Cuando se introduce un capilar en un recipiente con agua, ésta asciende por el capilar como si trepase "agarrándose" por las paredes, hasta alcanzar un nivel superior al del recipiente, donde la presión que ejerce la columna de agua se equilibra con la presión capilar.

#### *1.1.7. Tensión superficial*

Por su misma propiedad de cohesión, el agua tiene una gran atracción entre las moléculas de su superficie, creando tensión superficial.

La superficie del líquido se comporta como una película capaz de alargarse y al mismo tiempo ofrecer cierta resistencia al intentar romperla; esta propiedad contribuye a que algunos objetos muy ligeros floten en la superficie del agua.

Las gotas de agua son estables también debido a su alta tensión superficial. Esto se puede ver cuando pequeñas cantidades de agua se ponen en superficies no solubles, como el vidrio, donde el agua se agrupa en forma de gotas.

#### *1.1.8. Calor específico*

También esta propiedad está en relación con los puentes de hidrógeno que se crean entre las moléculas de agua. El agua puede absorber grandes cantidades de calor que utiliza para romper los puentes de hidrógeno, por lo que la temperatura se eleva muy lentamente.

El calor específico del agua es de  $1 \text{ cal/}^\circ\text{C} \cdot \text{g}$ .

Esta propiedad es fundamental para los seres vivos, ya que gracias a esto, el agua reduce los cambios bruscos de temperatura, siendo un regulador térmico muy bueno. También ayuda a regular la temperatura de los animales y las células permitiendo que el citoplasma acuoso sirva de protección ante los cambios de temperatura. Así se mantiene la temperatura constante.

La capacidad calorífica del agua es mayor que la de otros líquidos.

Para evaporar el agua se necesita mucha energía. Primero hay que romper los puentes y posteriormente dotar a las moléculas de agua de la suficiente energía cinética para pasar de la fase líquida a la gaseosa. Para evaporar un gramo de agua se precisan 540 calorías, a una temperatura de  $20^\circ\text{C}$ .

#### *1.1.9. Temperatura de fusión y evaporación*

Presenta su punto de ebullición de  $100^\circ\text{C}$  ( $373,15 \text{ K}$ ) a presión de una atmósfera.

El calor latente de evaporación del agua a  $100^\circ\text{C}$  es  $540 \text{ cal/g}$  (ó  $2260 \text{ J/g}$ )

Tiene un punto de fusión de  $0^\circ\text{C}$  ( $273,15 \text{ K}$ ) a presión de una atmósfera.

El calor latente de fusión del hielo a  $0^\circ\text{C}$  es de  $80 \text{ cal/g}$  (ó  $335 \text{ J/g}$ ).

Tiene un estado de sobreenfriado líquido a  $-25^\circ\text{C}$

La temperatura crítica del agua (es decir aquella a partir de la cual no puede estar en estado líquido independientemente de la presión a la que esté sometida) es de  $374^\circ\text{C}$  y se corresponde con una presión de  $217,5$  atmósferas.

Cabe señalar, que como se ha comentado antes, el agua no es  $\text{H}_2\text{O}$  como tal, sino que es una combinación los isótopos de hidrógeno y oxígeno, lo que hace, unido a su polaridad, que todas sus constantes físicas sean anormales; el punto de ebullición debería ser  $-63,5^\circ\text{C}$ .

#### *1.1.10. Conductividad*

La conductividad eléctrica de una muestra de agua es la expresión numérica de su capacidad para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones en el agua, de su concentración total, de su movilidad, de su carga y de las concentraciones relativas, así como de la temperatura.

De los muchos factores que afectan el comportamiento de los iones en solución, las atracciones y repulsiones eléctricas entre iones y la agitación térmica, son

quizá los más importantes. Estos efectos se expresan a través de un parámetro conocido como fuerza iónica,  $\mu$ :

$$\mu = \frac{1}{2} \sum C_i \cdot Z_i^2 \quad (1)$$

donde  $C_i$  y  $Z_i$  representan la concentración y carga iónica del componente  $i$ .

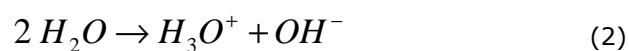
Las soluciones de la mayoría de los ácidos, bases y sales inorgánicas son relativamente buenos conductores de la corriente eléctrica. Inversamente, las soluciones acuosas de solutos orgánicos, que no se disocian o que se disocian muy poco en el agua, poseen conductividades eléctricas muy bajas o similares a las del agua pura.

En la mayoría de soluciones acuosas, cuanto mayor es la concentración de sales disueltas, mayor es su conductividad eléctrica. Este efecto continúa hasta el punto de saturación de la sal o hasta que la solución se halla tan concentrada en iones que la restricción del movimiento, causada por un aumento posterior en la concentración, disminuye la conductividad eléctrica del sistema.

Puesto que a mayor temperatura, menor viscosidad, y a menor viscosidad, mayor libertad de movimiento, la temperatura también tiene una marcada influencia sobre la conductividad eléctrica de un sistema acuoso. Si bien el incremento de la conductividad eléctrica con la temperatura puede variar de un ión a otro, en general, se acepta que ésta aumenta en promedio un 3% por cada grado centígrado que aumente la temperatura.

#### *1.1.11. Otras propiedades*

No posee propiedades ácidas ni básicas. Con ciertas sales forma hidratos. Reacciona con los óxidos de metales formando bases. Es catalizador en muchas reacciones químicas. Presenta un equilibrio de autoionización, autoprotolisis del agua:



#### *1.1.12. Propiedades biológicas*

El agua es esencial para todos los tipos de vida, por lo menos tal y como la entendemos.

El agua es excelente disolvente de sustancias tóxicas y compuestos bipolares. Incluso moléculas biológicas no solubles, como lípidos, forman con el agua, dispersiones coloidales.

Participa como agente químico reactivo en las reacciones de hidratación, hidrólisis y redox.

Permite la difusión, es decir, el movimiento en su interior de partículas sueltas, constituyendo el principal transporte de muchas sustancias nutritivas.

Constituye un excelente termorregulador (calor específico), permitiendo la vida de organismos en una amplia variedad de ambientes térmicos.

Ayuda a regular el calor de los animales. Tiene un importante papel como absorbente de radiación infrarroja, crucial en el efecto invernadero.

Interviene en el mantenimiento de la estructura celular.

Proporciona flexibilidad a los tejidos.

Actúa como vehículo de transporte en el interior de un ser vivo y como medio lubricante en sus articulaciones.

La vida en la Tierra ha evolucionado gracias a las importantes características del agua. La existencia de esta abundante sustancia en sus formas líquida, gaseosa y sólida ha sido sin duda un importante factor en la abundante colonización de los diferentes ambientes de la Tierra por formas de vida adaptadas a estas variantes y a veces extremas condiciones.

## 1.2. Clasificación

A principios del siglo XIX empezó a hacerse notar la polución y la contaminación acuática, como consecuencia del desarrollo de la población mundial, ya que empezaron a incrementarse las concentraciones urbanas y en desarrollo industrial.

El agua que se encuentra en la naturaleza ha ido adquiriendo, a lo largo de su ciclo hidrológico y como consecuencia de la actividad humana, diversas sustancias que definen sus características, y por tanto, sus posibles usos.

Las diferentes sustancias que puede contener un agua pueden ser orgánicas o biodegradables e inorgánicas o biorresistentes, y pueden encontrarse en las mismas disueltas (solubles) o en suspensión (insolubles).

$\frac{3}{4}$  partes de la materia orgánica presente es agua, y las sustancias sólidas, que pueden estar disueltas o en suspensión, como se ha comentado antes, están formadas por:

- Bacterias muertas, aproximadamente un 30 %.
- Grasas. La mayoría provienen de ácidos grasos no absorbidos, grasas sintetizadas por las bacterias y grasas de restos celulares, entre un 10 y un 20 %.
- Sustancias inorgánicas, aproximadamente un 20 %.
- Restos no digeribles, un 30 %, que son componentes sólidos de jugos digestivos como pigmentos biliares y detritus celulares.

Podemos clasificar las aguas residuales de diversas maneras. En este caso lo haremos en función de su origen, que lleva inherente una relativa clasificación de composición.

### 1.2.1. Aguas Residuales Urbanas (ARU)

Son los vertidos que se generan en los núcleos de población urbana, como consecuencia de las actividades propias de estos. Los aportes que generan esta agua son:

- Aguas negras, fecales o aguas sanitarias son las aguas mezcladas con las exoneraciones corporales. Es el agua que una vez ha sido utilizada por el hombre ha quedado polucionada. Es una combinación de las aguas procedentes de los retretes de las viviendas, de los centros comerciales, etc.



- Aguas de lavado doméstico, son las llamadas aguas grises, que según el Diccionario Técnico del Agua son "las procedentes de los usos domésticos antes de mezclarse con las aguas fecales. Proceden del lavado de ropa, limpieza de la casa, desperdicios de comida, etc." Contienen materia en suspensión formadas por tierra, arena y diversas materias insolubles, materia orgánica, grasas, detergentes y sales diversas.
- Aguas de drenaje de calles. Estas aguas presentan, en general, un volumen muy pequeño, y su contaminación depende de las condiciones locales.
- Agua de lluvia y lixiviados. Es el agua que cae de las nubes en forma líquida o sólida. Es un agua que nunca es pura. Contiene disueltos distintos gases, además de determinados iones que se encuentran en la atmósfera en forma de polvo y que son resultado o consecuencia de diversos fenómenos que en ella se producen. Esto es, particularmente notable, en las zonas industriales y en las grandes aglomeraciones urbanas, en la que la atmósfera que los rodea está extraordinariamente polucionada.

Las aguas residuales urbanas presentan cierta homogeneidad cuanto a composición y carga contaminante, ya que sus aportes van a ser siempre los mismos, es decir, su composición varía muy poco de unas poblaciones a otras, tanto cuantitativa como cualitativamente.

Pero esta homogeneidad tiene unos márgenes amplios, ya que las características de cada vertido urbano van a depender del núcleo de población en que se genere, influyendo parámetros tales como el número de habitantes, la existencia de industrias dentro del núcleo, tipo de industria, etc.

### *1.2.2. Aguas Residuales Industriales*

Son aquellas que proceden de cualquier actividad o negocio en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice agua.

Presentan características muy distintas de las aguas residuales urbanas. Son enormemente variables en cuanto a caudal y composición, difiriendo las características de los vertidos, no sólo de una industria a otra, sino también dentro de un mismo tipo de industria.

A veces, las industrias no emiten vertidos de forma continua, sino únicamente en determinadas horas del día o incluso únicamente en determinadas épocas del año, dependiendo del tipo de producción y del proceso industrial. También son habituales las variaciones de caudal y carga a lo largo del día.

Están más contaminadas que las aguas residuales urbanas, además, con una contaminación mucho más difícil de eliminar. Su alta carga unida a la enorme variabilidad que presentan, hace que el tratamiento de las aguas residuales sea complicado. Por esta razón, al querer adentrarse en el amplio mundo del conocimiento de las aguas residuales industriales, se corre el peligro de equivocarse al querer simplificar el problema, intentando generalizar e incluso querer extrapolar, aplicando las técnicas que se aplican en las aguas residuales urbanas. Por esta razón es necesario un estudio específico en cada caso.

Para conocer las aguas residuales de una determinada industria se debe, en primer lugar, abordar los complejos problemas que presenta el uso del agua

dentro de la misma, de tal suerte que, hasta que no se tenga un conocimiento profundo del mismo, no se debe intentar emprender los problemas de polución y su tratamiento. Téngase muy en cuenta que no existe un procedimiento universal de depuración.

Por otra parte, es muy interesante conocer la distribución del agua dentro de las distintas líneas de fabricación, así como su consumo, llevando los datos a gráficos que indiquen los caudales máximos y mínimos utilizados, relacionándolos con la fabricación, el personal, la hora del día o de la noche, ya que la calidad de las aguas residuales vendrá en muchos casos influenciada por estos factores.

De todo lo anterior se deduce que nunca se podrá expresar la carga contaminante de una agua residual de una determinada industria por medio de una muestra media, ya que deben conocerse las concentraciones máximas y mínimas de los contaminantes que pueden influir en el correcto funcionamiento de la estación de tratamiento, así como con la frecuencia en que aparecen los valores significativos.

La complejidad de las aguas residuales industriales hace que sea difícil, por no decir imposible, encerrarlas dentro de una clasificación, por muy complicada que sea, y que existen prácticamente tantas aguas residuales industriales como industrias. Por esto, han sido muchas las clasificaciones que se han propuestos para éstas, ninguna totalmente aceptada. La más corriente hace referencia a la clase de industria que originó estas aguas, intentando agruparlas por su composición cualitativa más probable.

De acuerdo con la posibilidad de biodegradación de la materia orgánica presente, se pueden distinguir tres clases de aguas:

- Aguas residuales industriales que contienen materia orgánica
  - o Con aporte de nitrógeno y fósforo
  - o Sin aporte de nitrógeno y fósforo
- Aguas residuales industriales que sólo contienen sustancias minerales
  - o Con sustancias tóxicas
  - o Sin sustancias tóxicas
- Aguas residuales mixtas

Otra clasificación tiene en cuenta el grado de nocividad de determinadas sustancias contaminantes en relación con los organismos vivos presentes en el seno del agua.

- Aguas residuales industriales cuyas sustancias químicas contaminantes no interfieran la vida en el agua
- Aguas residuales industriales cuyas sustancias contaminantes son nocivas para la vida en el agua
- Aguas residuales industriales que tienen en su seno alguna sustancia tóxica que pueda entorpecer o ralentizar la vida en el agua.

Esta clasificación es muy relativa, ya que implica, entre otros conceptos, tener en cuenta los de concentración y dilución.

La palabra concentración quiere expresar la cantidad de sustancias disueltas en un volumen determinado de disolvente. Es un concepto de nocividad de las sustancias orgánicas, concepto relativo, ya que por una parte se encuentra que habrá que medirlo para poder tener una referencia. En este caso la concentración expresará la medida de las sustancias disueltas contenidas en la unidad de volumen o peso de la disolución o del disolvente.

El conocer esta concentración ha sido la preocupación de muchos investigadores, ya que conocida ésta es posible optimizar el tratamiento biológico de aguas residuales en presencia de tóxicos más o menos energéticos para los microorganismos, tanto que su dosis letal medio ( $DL_{50}$  es la concentración de tóxico tal que al cabo de cierto tiempo, generalmente 24 horas, han muerto del 50% de los organismos objeto de experimentación), como en su dosis mínima mortal (dosis mínima de tóxico que provoca, al menos, la muerte aparente de determinada clase de organismos en el tiempo de duración de la experiencia).

El encontrar estas concentraciones es muy complicado, ya que por una parte se encuentra con una variedad grande de organismos y por otra las interacciones, tanto sinérgicas como antagónicas, que pueden ejercer las diversas sustancias presentes en las aguas.

En relación con la dilución, ésta consiste fundamentalmente en mezclar las aguas residuales con aguas limpias a fin de reducir la concentración de los tóxicos por debajo de sus valores nocivos, es decir, dilución límite, que referida a estos tóxicos, indica la concentración de los mismos que no provoca acción nociva, en un tiempo determinado, sobre los organismos que se consideran.

Es esto se funda la evacuación de aguas residuales por dilución, operación que consiste en verter las aguas residuales, sin tratar, o tratadas de diverso grado, sobre cauces de agua sin polucionar. Esto, que antiguamente era usual en lo referente a aguas residuales de poblaciones sin tratar, debido a su pequeño volumen, hoy día no se realiza nada más que en casos muy excepcionales de fuerza mayor, aun siendo el coeficiente de dilución mayor 1:6 que es lo que se considera suficiente, en lo que a aguas negras se refiere. En general, incluso con aguas residuales urbanas depuradas, hay que contemplar el efecto de dilución al verterlas al cauce receptor.

### *1.2.3. Aguas Mixtas*

La calidad y cantidad de las aguas residuales generadas por una población está muy influenciada por la incorporación a las mismas, periódica o accidental, de vertidos industriales.

En relación con la calidad, las variaciones de carga de las aguas residuales industriales, ya sea cualitativa o cuantitativamente, perturban el funcionamiento de las depuradoras y se produce cuando las industrias existentes varían su programa de fabricación. Una sobrecarga en materias orgánicas provoca una demanda mayor de oxígeno, generándose lodos voluminosos de escasa densidad que sedimenten difícilmente. Es una depuradora de lechos bacterianos provocan la aparición de una vegetación abundante que se refleja en colmataciones y producción de olores.

Las variaciones cualitativas de la carga orgánica, caracterizadas por cambios en la estructura química de las materias orgánicas contenidas en los efluentes, obligan a los microorganismos a desarrollar nuevos sistemas enzimáticos, lo que

exige un periodo más o menos largo de maduración y adaptación a las condiciones ecológicas del medio: pH, temperatura, presión osmótica y elementos tóxicos.

Cuando aumente, durante un tiempo notable, el caudal de un vertido disminuye el tiempo de permanencia de las aguas residuales en la depuradora, reduciéndose la eficiencia de la misma.

El tratamiento en común de las aguas residuales urbanas e industriales constituye la solución más eficaz del problema de depuración de efluentes. Por esto, en el estudio de la depuración de las aguas residuales es muy importante conocer la acción tóxica de determinadas sustancias, ya que éstas puede ralentizar e incluso anular, la acción de los microorganismos que actúan en la depuración de las aguas.

A pesar de los posibles inconvenientes que se pueden presentar en las aguas mixtas como consecuencia de determinados contaminantes, siempre que sea posible es aconsejable que la industria trate sus aguas residuales mezcladas con las urbanas, ya que entre otras ventajas se tiene:

- División de los costos de depuración. El mayor tamaño de la planta depuradora disminuye el costo de operación por unidad de carga polucionante.
- Las aguas residuales urbanas aportan nutrientes, como nitrógeno y fósforo, a las aguas residuales industriales que sean deficitarias de esos elementos.
- Garantiza una depuración más uniforme de las aguas residuales.

Ahora bien, el aporte de las aguas residuales industriales trae algunos perjuicios, por lo que deben controlarse:

- La homogeneidad de las aguas residuales
- La uniformidad del caudal
- El pH
- Que no existan inhibidores ni compuestos tóxicos
- Que el contenido en aceites y grasas no sea excesivo

El buen funcionamiento de una estación depuradora de aguas residuales mixtas exige, que las aguas residuales que llegan a ella, cumplan los requisitos siguientes:

- No tener una temperatura superior a 60 °C
- La concentración de grasas no debe ser superior a 100 mg/l
- No deben existir residuos tóxicos inflamables o explosivos
- El pH debe estar comprendido entre 5,5 y 9,0
- Las aguas no deben tener una DBO<sub>5</sub> superior a la calculada para un correcto funcionamiento de la estación depuradora.
- Los sólidos en suspensión no deben superar los 350 mg/l
- Se deben establecer límites del volumen de admisión de las aguas residuales industriales

## 1.3. Composición

Las sustancias contaminantes que pueden aparecer en un agua residual son muchas y diversas.

- Contaminantes orgánicos: son compuestos cuya estructura química está compuesta fundamentalmente por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Son los contaminantes mayoritarios en vertidos urbanos y vertidos generados en la industria agroalimentaria. Los compuestos orgánicos que pueden aparecer en las aguas residuales son:
  - o **Proteínas**. Proceden fundamentalmente de excretas humanas o de desechos de productos alimentarios. Son biodegradables, bastantes inestables y responsables de malos olores.
  - o **Carbohidratos**. Incluimos en este grupo azúcares, almidón y fibras celulósicas. Proceden, al igual que las proteínas, de excretas y desperdicios.
  - o **Aceites y grasas**: altamente estables, inmiscibles con el agua, proceden de desperdicios alimentarios en su mayoría, a excepción de los aceites minerales que proceden de otras actividades.
  - o **Otros**. Incluiremos varios tipos de compuestos como los tensioactivos, fenoles, organoclorados y organofosforados. Su origen es variable y presentan elevada toxicidad.
- Contaminantes inorgánicos. Son de origen mineral y de naturaleza variada, tales como sales, óxidos, ácidos y bases inorgánicas, metales, etc. Aparecen en cualquier tipo de agua residual, aunque son más abundantes en los vertidos generados por la industria. Los componentes inorgánicos de las aguas residuales estarán en función del material contaminante así como de la propia naturaleza de la fuente contaminante.
- Contaminantes habituales en las aguas residuales.
  - o **Arenas**: entendemos como tales, a una serie de partículas de tamaño apreciable y que en su mayoría son de naturaleza mineral, aunque pueden llevar adherida materia orgánica. Las arenas enturbian las masas de agua cuando están en movimiento, o bien forman depósitos de lodos si se encuentran en condiciones adecuadas.
  - o **Aceites y grasas**. Son todas aquellas sustancias de naturaleza lipídica, que al ser inmiscibles con el agua, van a permanecer en la superficie dando lugar a la aparición de natas y espumas. Estas natas y espumas entorpecen cualquier tipo de tratamiento físico o químico, por lo que deben eliminarse en los primeros pasos del tratamiento de un agua residual.
  - o **Residuos con requerimiento de oxígeno**. Son compuestos tanto orgánicos como inorgánicos que sufren fácilmente y de forma natural procesos de oxidación. Estas oxidaciones van a realizarse bien por vía química o por vía biológica.

- **Nitrógeno y fósforo.** Tienen un papel fundamental en el deterioro de las masas acuáticas. Su presencia en las aguas residuales es debida a detergentes y fertilizantes, principalmente. El nitrógeno orgánico también es aportado a las aguas residuales a través de las excretas humanas.
- **Agentes patógenos.** Son capaces de producir o transmitir enfermedades.
- **Otros contaminantes específicos.** Incluimos sustancias de naturaleza diversa que provienen de aportes muy concretos, como los metales pesados, fenoles, petróleo, pesticidas, etc.

La composición de las aguas residuales se refiere a las cantidades de constituyentes físicos, químicos y biológicos presentes. En la siguiente tabla se señala la composición típica de un agua residual doméstica.

**Tabla 1.** *Constituyentes del agua residual y del líquido séptico de un agua residual doméstica.*

Contaminantes	Unidades	Concentración		
		Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales (ST)	mg/l	350	720	1200
Disueltos totales (SDT)	mg/l	250	500	850
Sólidos en suspensión (SS)	mg/l	100	220	350
Sólidos sedimentables	mg/l	5	10	20
DBO <sub>5</sub> , 20°C	mg/l	110	220	400
COT	mg/l	80	160	290
DQO	mg/l	250	500	1000
Nitrógeno	mg/l	20	40	85
Orgánico	mg/l	8	15	35
Amoniaco libre	mg/l	12	25	50
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo	mg/l	4	8	15
Orgánico	mg/l	1	3	5
Inorgánico	mg/l	3	5	10
Cloruros	mg/l	30	50	100
Sulfato	mg/l	20	30	50
Alcalinidad (CaCO <sub>3</sub> )	mg/l	50	100	200
Grasa	mg/l	50	100	150
Coliformes totales	nº/100 ml	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>9</sup>
COVs	µg/l	<100	100-400	>400

En función de las concentraciones de estos constituyentes, podemos clasificar el agua residual como concentrada, media o débil. Tanto los constituyentes como sus concentraciones presentan variaciones en función de la hora del día, el día de la semana, el mes del año y otras condiciones locales. Por esta razón, los datos

de la tabla anterior pretenden solamente servir de guía, y no como base de proyecto.

Dentro de la contaminación de las aguas residuales, existen contaminantes con mayor o menor importancia.

Las normas que regulan los tratamientos secundarios están basadas en las tasas de eliminación de la materia orgánica, sólidos en suspensión y patógenos presentes en el agua residual. Existen normas más exigentes que incluyen la eliminación de nutrientes y contaminantes prioritarios. Cuando se pretende reutilizar el agua residual, las exigencias normativas incluyen también la eliminación de compuestos orgánicos refractarios, metales pesados y sólidos orgánicos disueltos.

**Tabla 2.** Contaminantes de importancia en el tratamiento de las aguas residuales.

CONTAMINANTE	RAZÓN DE LA IMPORTANCIA
Sólidos en suspensión	Pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales, la materia orgánica biodegradable se mide, en la mayoría de las ocasiones, en función de la DBO y la DQO. Si se descargan al entorno sin tratar su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas.
Patógenos	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los organismos patógenos presentes en el agua.
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten al entorno acuático, estos nutrientes pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, también pueden provocar la contaminación del agua subterránea.
Contaminantes prioritarios	Son compuestos orgánicos e inorgánicos determinados en base a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad aguda conocida o sospechada. Muchos de estos compuestos se hallan presentes en el agua residual.
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento. Ejemplos típicos son los agentes tensioactivos, los fenoles y los pesticidas agrícolas.

Metales pesados	Son, frecuentemente, añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y puede ser necesario eliminarlos si se pretende reutilizar al agua residual.
Sólidos inorgánicos disueltos	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro. Como consecuencia del uso del agua, y es posible que se deban eliminar si se va a reutilizar el agua residual.

Por supuesto, la contaminación del agua depende de los compuestos que haya adquirido; en la siguiente tabla se resume la procedencia de los constituyentes más elementales.

**Tabla 3.** Procedencia de los contaminantes más abundantes.

CARACTERÍSTICAS	PROCEDENCIA
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>	
Color	Aguas residuales domésticas e industriales, degradación natural de materia orgánica
Olor	Agua residual en descomposición, residuos industriales
Sólidos	Agua de suministro, aguas residuales domésticas e industriales, erosión del suelo, infiltración y conexiones incontroladas
Temperatura	Aguas residuales domésticas e industriales
<b>CONSTITUYENTES QUÍMICOS</b>	
<u>ORGÁNICOS</u>	
Carbohidratos	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Grasas animales, aceites y grasas	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Pesticidas	Residuos agrícolas
Fenoles	Vertidos industriales
Proteínas	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Contaminantes prioritarios	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales



Agentes tensioactivos	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
COV	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Otros	Degradación natural de la materia orgánica

### INORGÁNICOS

Alcalinidad	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea
Cloruros	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea
Metales pesados	Vertidos industriales
Nitrógeno	Residuos agrícolas y aguas residuales domésticas
pH	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Fósforo	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Contaminantes prioritarios	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Azufre	Agua de suministro, aguas residuales domésticas, comerciales e industriales

### GASES

Sulfuro de hidrógeno	Descomposición residuos domésticos
Metano	Descomposición residuos domésticos
Oxígeno	Agua de suministro, infiltración de agua superficial

### **CONSTITUYENTES BIOLÓGICOS**

Animales	Cursos de agua y plantas de tratamiento
Plantas	Cursos de agua y plantas de tratamiento
Protistas	
<i>eubacterias</i>	Aguas residuales domésticas, infiltración agua superficial, plantas de tratamiento

arqueobacterias	Aguas residuales domésticas, infiltración agua superficial, plantas de tratamiento
Virus	Aguas residuales domésticas

Por último, se facilitan datos aproximados acerca del tipo y número de microorganismos que suelen encontrarse en las aguas residuales domésticas.

**Tabla 4.** Tipo o número de microorganismos típicamente presentes en las aguas residuales domésticas.

Organismos	Concentración, número/ml
<i>Coliformes</i> totales	$10^5$ - $10^6$
<i>Coliformes</i> fecales	$10^4$ - $10^5$
<i>Streptococos</i> fecales	$10^3$ - $10^4$
<i>Enterococos</i>	$10^2$ - $10^3$
<i>Shigella</i>	Presentes
<i>Salmonella</i>	$10^0$ - $10^2$
<i>Pseudomonas</i> <i>areginosa</i>	$10^1$ - $10^2$
<i>Clostridium</i> <i>perfringens</i>	$10^1$ - $10^3$
<i>Mycobacterium</i> <i>tuberculosis</i>	Presentes
Cistos de <i>protozoos</i>	$10^1$ - $10^3$
Cistos de <i>giarda</i>	$10^{-1}$ - $10^2$
Cistos de <i>cryptosporidium</i>	$10^{-1}$ - $10^1$
Huevos de <i>helminos</i>	$10^{-2}$ - $10^1$
Virus entéricos	$10^1$ - $10^2$

## 1.4. Parámetros para medir la contaminación

La necesidad de cuantificar las sustancias que tienen capacidad de contaminar una masa de agua potable (solubles, insolubles, biodegradables o biorresistentes), ha traído como consecuencia, en primer lugar, el tener que

definir lo que se entiende por contaminación, y en segundo lugar, el fijar unos parámetros o variables que permitan cuantificarla.

Esta cuantificación no nos permite compararla, ya que es imposible, pero si tratar de eliminarla, y si esto no es factible (que no lo es totalmente en la mayoría de los casos), mitigarla, hasta tal punto, que su acción sea minimizada para poder utilizar el agua en los distintos usos a que necesita destinarla el hombre.

Cuando se enfrenta el problema de definir lo que es la polución, se da inmediatamente cuenta de lo difícil que resulta, dada la complejidad del tema. Para realizar esta definición, se han tenido en cuenta, fundamentalmente, tres conceptos:

- Descarga en el ambiente de materiales extraños al mismo
- Cambio mensurable del ambiente
- Disminución del valor para el uso humano

Por tanto, podemos definir la contaminación como la introducción en un medio cualquiera, en este caso el agua, de un contaminante, o combinación de agentes contaminantes, o introducción de energía que pueda provocar efectos nocivos para la salud, la seguridad, el bienestar en el ambiente o provocar desequilibrio en el medio, irreversible o no, de manera que se alteren desfavorablemente las condiciones naturales.

Cuando se ha querido reducir el daño que las aguas residuales producen en el medio que las recibe, se ha encontrado, como primera medida a tomar, la de medir de alguna manera, la cantidad de polución que las mismas llevan y así poder valorar la degradación, mayor o menor, que pueda producir. Esto es imprescindible cuando se quiere controlar, tanto legal como técnicamente, la contaminación del agua.

Ahora bien, es un objetivo casi inalcanzable establecer unos parámetros comunes y una cuantificación general para todas las variedades de polución que se pueden presentar. Solamente se podrán establecer comparaciones, cuando se encuentren alteraciones de las aguas provocadas por el mismo tipo de sustancias. Todas las extrapolaciones que se hagan en este campo de la comparación de las distintas alteraciones que sufre una masa de agua, han de ser contempladas con reservas y siempre teniendo en cuenta los fundamentos científicos que autorizan la comparación, y los errores cometidos hasta alcanzar el resultado.

Es importante tener en cuenta una filosofía de vertido de las aguas residuales estabilizadas, en la que queda claramente especificado que se debe depurar siempre en escalones de eficacia, de acuerdo con las características del cauce receptor, y como mínimo en un grado tal que permita la vida de la flora y fauna acuática, siempre que no haya peligro para la salud. Además de su importancia desde el punto de vista de ayuda a la autodepuración de las aguas, tendrá la de lograr el mantenimiento de unos objetivos de calidad acordes con los futuros usos que se debe hacer del agua.

De aquí la necesidad que se tiene de establecer una serie de parámetros, a fin de poder aproximarnos a la realidad, que permitan conocer el estado de alteración de una masa de agua que se pretende estudiar. Por supuesto que, como ya se ha indicado, los parámetros serán distintos según sean los objetivos a alcanzar.

Dada la multitud de sustancias que puede contener un determinado tipo de agua, es necesario conocer, si no todos los elementos y compuestos que contiene, porque eso es materialmente imposible, si los que de alguna manera reaccionan igual o tienen características parecidas.

Generalmente, los parámetros que se utilizan para determinar la calidad de un agua pueden ser:

- Físicos. Estos parámetros dan una información clara de determinadas características del agua, como son el pH, los sólidos en suspensión, color, olor, sabor, temperatura, turbidez, conductividad, etc.
- Químicos inorgánicos: abarca todos los cationes, aniones, metales traza, determinados índices de contaminación, etc. Todos indican, en cada momento, las características del agua que interesan para un objetivo propuesto. Pueden encontrarse de diversas formas, como macroconstituyentes, elementos traza o incluso de manera esporádica, como consecuencia de la contaminación. La determinación va en función del parámetro a analizar, pero normalmente se requieren aparatos sofisticados como absorción atómica, infrarrojos, etc.
- Los parámetros químicos orgánicos son el grupo más amplio y complejo, abarcando por un lado indicadores del contenido orgánico en general, como la Demanda Biológica de Oxígeno, Carbono Orgánico Total, o bien otros como aceites y grasas, plaguicidas, detergentes, etc. La determinación de estos parámetros también puede presentar complejidad.
- Microbiológicos. Abarcan dos amplios campos muy diferenciados: los bacterianos y los de los demás organismos, vegetales o animales, susceptibles de estar presentes en las aguas. A los primeros se refieren, entre otros, los índices de contaminación fecal, empleado para el conocimiento de la calidad del agua de bebida.
- Radiológicos. Como más importantes abarcan las partículas alfa y beta y las radiaciones gamma.

Los parámetros, a su vez, se pueden dividir, en específicos, sustitutos e indicadores.

Los parámetros específicos son, por ejemplo, el análisis de los componentes mayoritarios, aniones, cationes, metales traza, etc.

Cuando la determinación del parámetro específico es complicado o imposible, se suele utilizar, o un parámetro sustituto o un parámetro indicador. Entre los primeros se encuentran parámetros tan usados como la DQO, DBO, etc.

## 1.5. Autodepuración

Cuando un agua residual es vertida a un curso de agua, se provoca la perturbación general del ecosistema, tanto en el plano fisicoquímico como en el biológico.

La Naturaleza trata de limitar del desequilibrio producido, llevando a cabo una serie de reacciones espontáneas de los factores bióticos y abióticos que intentan que el curso de agua vuelva al equilibrio ecológico inicial.

Los factores bióticos con los microorganismos y las reacciones bioquímicas que en ellos se producen.

Los factores abióticos son los componentes fisicoquímicos que dependen no sólo de la naturaleza del contaminante y de su capacidad de dilución, dispersión y sedimentación, sino que además están influidos por la dinámica del medio receptor y por las reacciones químicas (redox, precipitación, adsorción, etc.) que sean capaces de producirse en el medio.

La autodepuración biológica son los procesos que se realizan espontáneamente en el agua de los ríos por medio de los microorganismos, contribuyendo a que se eliminen del agua los compuestos biodegradables indeseables que se encuentran disueltos.

Los procesos biológicos de depuración de las aguas residuales se basan en el proceso natural de la autodepuración de las aguas, y por tanto, en los requerimientos nutricionales de los microorganismos.

Los procesos que se realizan en una depuradora biológica son los mismos que ocurren en la autodepuración, potenciando los procesos que se crean más eficaces y ralentizando otros.

### *1.5.1. El Mar como receptor*

La autodepuración en el medio marino se realiza por alguna de las vías siguientes:

- Bacterias. Las bacterias son fundamentales tanto en tierra como en Mar para cerrar los ciclos geoquímicos. La materia circula en circuito cerrado y las bacterias son organismos clave para este proceso. Estas, mediante diversas reacciones bioquímicas relacionadas con la respiración celular, fermentación, fotosíntesis, etc., degradan compuestos orgánicos e inorgánicos disueltos o en suspensión, compuestos que resultan para ellas fácilmente metabolizables e imprescindibles para el mantenimiento de su vida. En el medio marino podemos encontrar:
  - o Bacterias que degradan la materia orgánica, reduciéndola a compuestos minerales estables.
  - o Bacterias que degradan el ácido sulfhídrico, sulfobacterias, y que lo convierten en azufre.
  - o Bacterias que oxidan el metano, metanobacterias, a dióxido de carbono.

Los procesos bacterianos pueden ser aerobios, que implican el consumo de oxígeno como en la respiración, o anaerobios, que conllevan el desprendimiento de determinados gases, como el metano.

Las bacterias también se van implicadas en oxidaciones químicas y bioquímicas en los sedimentos, donde se oxidan muchas moléculas inorgánicas (hierro, azufre, amoníaco, nitritos, etc.) y en la materia orgánica sedimentada que conlleva la disminución del oxígeno del medio.

- Sedimentación. Comprende la materia en suspensión que pasa al sedimento.

- Diversas reacciones químicas. Dependiendo de la naturaleza del contaminante, pueden producirse diversas reacciones químicas redox, ácido – base, adsorción, etc. Así, la materia disuelta cambia de forma y se incorpora al sedimento.
- Intercambio de calor y componentes volátiles. Entre la atmósfera y el agua de los mares existe un intercambio continuo de calor por la superficie del agua. Un aumento de temperatura del agua implica una mayor evaporación y una refrigeración del mar. Al mismo tiempo, se verifica un intercambio de gases disueltos, y en particular, entre dióxido de carbono y el oxígeno, intercambio que también depende de la temperatura del agua.

### 1.5.2. El Rio como receptor

En el rio, si el agua permanece lo suficientemente aireada no habrá problemas en volver a las condiciones ambientales previas al vertido, pero si el aporte de oxígeno no es suficiente, las degradaciones pasan a ser anaerobias, provocando eutrofización y todo tipo de putrefacciones con todos sus daños y patogenicias.

El oxígeno disuelto presente en el seno del agua tiene como origen varias causas, siendo las más importantes:

- El intercambio con la atmósfera. La solubilidad del oxígeno aumenta a medida que la temperatura se acerca a 0 °C, que es el punto de saturación del oxígeno.
- El movimiento natural del agua al pasar por cascadas o chocar con piedras y demás obstáculos.
- El aporte de efluentes con elevada concentración de oxígeno, no contaminados.
- El aporte de agua de lluvia, que al recorrer su camino desde la nube a la Tierra van cargándose de aire y añaden su oxígeno al curso de agua.
- Como consecuencia de la función clorofílica de las plantas presentes en la flora acuática.

La evolución de los ríos ante la presencia de vertidos contaminantes se realiza con acciones físicas, químicas y biológicas, en la típica reacción de los componentes de la Naturaleza antes situaciones ambientales extrañas.

Los iones presentes, complejos o no, sufren cierta evolución a lo largo del rio.

El oxígeno sufre una disminución inmediata, hasta que va recuperándose por las causas citadas anteriormente.

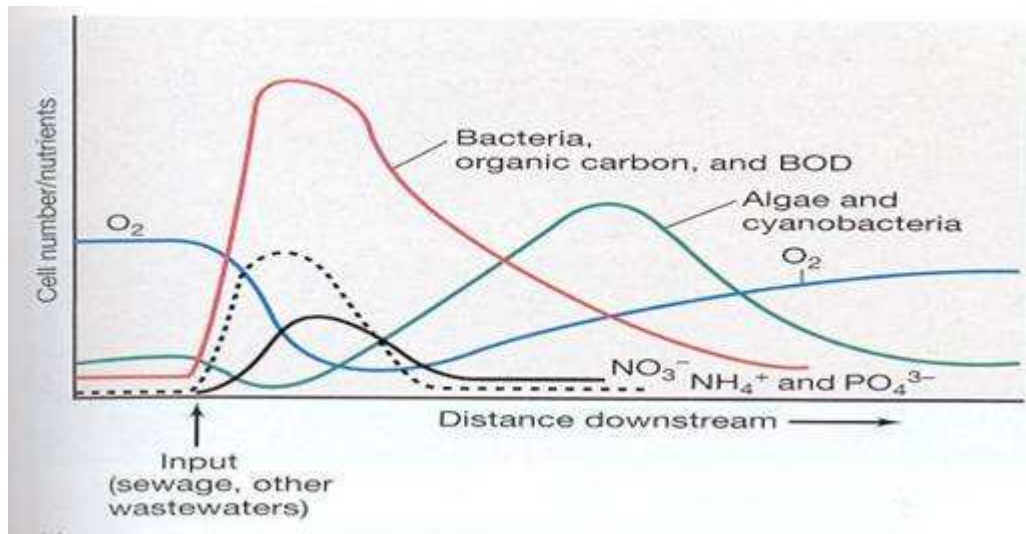
La DBO será máxima al principio, hasta que disminuya lentamente hasta valores normales.

Las sales y las materias en suspensión están también en concentraciones máximas al inicio, disminuyendo después rápidamente.

El amonio y fosfato iniciales van aumentando hasta que su concentración se hace máxima poco antes de ser mínima la concentración de oxígeno disuelto.

Los nitratos disminuyen inicialmente hasta casi desaparecer; va aumentando su concentración hasta que se hace máxima la concentración de oxígeno, y por último, disminuye lentamente hasta alcanzar valores normales.

Vertidos industriales pueden contener compuestos metálicos u otros de naturaleza no totalmente orgánica y que afectan gravemente a la autodepuración. Producen interferencias e inhibiciones que impiden o dificultan el proceso de autodepuración.



**Figura 2.** Efectos del vertido de agua residual en un río.

La autodepuración de los ríos ha sido la más estudiada, dado que es la más frecuente, razón por la cual se han establecido unas fases del proceso para su mejor comprensión:

- Aporte de materia orgánica
- Desarrollo masivo de bacterias
- Gran consumo de oxígeno
- Las capas más profundas se quedan sin oxígeno y se desarrollan en el fondo organismos anaerobios
- Predominan las fermentaciones
- Dominan las reducciones
- Muy pocas oxidaciones
- Sedimentación de lodos en putrefacción
- Formación de metano
- En la descomposición de las proteínas se forman  $H_2S$  y  $NH_3$
- Las sulfobacterias forman en el fondo costras blancas o rojizas
- Una vez descompuesta casi toda la materia orgánica, ya no se consume enseguida todo el oxígeno del aire, por lo que empiezan a establecerse bacterias aerobias, que oxidan a muchos productos contaminantes
- Al reducirse la materia orgánica disponible desciende bruscamente el número de bacterias

- Formación de una cadena de procesos por parte de las bacterias especializadas, que llevan al final a la mineralización de toda la materia orgánica

La velocidad de autodepuración depende de:

- Movimiento del agua, a más rápido más autodepuración, ya que toma más oxígeno.
- Profundidad. A más profundidad, menos autodepuración debido a la escasez de oxígeno.
- Superficie. Cuanto mayor sea la superficie, mayor será el contacto con el oxígeno del aire.
- Presencia o ausencia de venenos para los microorganismos.

Por último, cabe nombrar la existencia de la fórmula de *Wuhrman*, que nos permite conocer el poder autodepurador.

$$S_a = \frac{S_m}{B} = \frac{Q(C_o - C_f)}{t(b' \cdot P \cdot v + b''Q)} \text{ mol/mg/seg} \quad (3)$$

Siendo:

$S_a$ : poder autodepurador

$S_m$ : tasa de autodepuración, en  $\text{mol}^{-1}$

$B$ : biomasa total

$Q$ : caudal, en  $\text{m}^3/\text{seg}$

$C_o$ : concentración de materia orgánica en el punto de vertido

$v$ : velocidad de la corriente, en  $\text{m}/\text{seg}$

$C_f$ : concentración de la materia orgánica al final del proceso

$P$ : longitud del perfil de la sección transversal, en  $\text{m}$

$t$ : tiempo de duración del proceso

$b'$ : biomasa béntica, en  $\text{g}/\text{m}^2$

$b''$ : biomasa en suspensión, en  $\text{g}/\text{m}^2$



# **CAPÍTULO 2:**

# **FUNDAMENTOS**

# **BÁSICOS**

El fundamento básico de la vida en la Tierra está basado en la capacidad que tienen los organismos autótrofos para sintetizar, mediante la fotosíntesis, y partiendo de elementos biogénicos inorgánicos (C, S, H<sub>2</sub>, P, N<sub>2</sub>, etc.), elementos complejos, como azúcares, grasas y albuminoides.

Por otra parte, los seres heterótrofos utilizan la energía almacenada en los compuestos energéticos citados anteriormente.

De esta forma, los seres heterótrofos actúan como parásitos de los seres autótrofos, ya que sin los productos elaborados por los seres autótrofos, los heterótrofos no disponen de energía necesaria para desarrollar sus funciones vitales.

El hombre, y en general los seres heterótrofos, son incapaces de captar la energía solar y usarla según sus necesidades biológicas y además, tampoco puede aprovechar toda la energía que almacenaron los organismos autótrofos, ya que, en los desechos que elimina, existen productos intermedios que poseen contenidos notables de energía.

Estos productos desechados, inestables, tienen a combinarse con el oxígeno, que puede presentarse libre en la atmósfera, disuelto en el agua o formando compuestos químicos, para alcanzar el grado máximo de oxidación. Por tanto, estos productos eliminados por el metabolismo fisiológico son reductores, presentando gran avidez por el oxígeno, encontrándose en un alto estado de inactividad. También tienen la posibilidad de transportar microorganismos patógenos, que consumen el oxígeno disuelto de las aguas, transmitiendo enfermedades contagiosas y provocando malos olores.

## **1.6. Fundamentos fisicoquímicos**

El objetivo fundamental del tratamiento biológico de las aguas residuales es estabilizar la materia orgánica biodegradable, gracias a la intervención de microorganismos específicos; por tanto, el éxito del tratamiento radicará en favorecer la proliferación de los mismos.

Estos microorganismos tienen la capacidad de generar una variedad de enzimas, que les permiten biodegradar, de manera específica, distintos compuestos orgánicos, proporcionándoles así una versatilidad metabólica.

Pero en los procesos de depuración biológica, intervienen, en asociación o combinación diferentes procesos, lo que nos da una ligera idea de la gran complejidad de la depuración. A continuación se describen los más característicos.

### 1.6.1. Adsorción y Absorción

El proceso de adsorción fue observado por primera vez para gases sobre carbón de madera en el año 1773 por C. W. Scheele<sup>22</sup> y luego para las soluciones por Lowitz en 1785, aunque los primeros estudios sistemáticos fueron realizados por T. de Saussure en 1814; actualmente es considerado como un fenómeno importante para la mayor parte de los procesos físicos naturales, biológicos y químicos.

La adsorción implica la acumulación en la interfase o la concentración de sustancias en una superficie o interfase. El proceso suele ocurrir en una interfase que separa dos fases, tales como líquido-líquido, gas-líquido, gas-sólido, o líquido-sólido. En material que se concentra en la superficie o se adsorbe se llama adsorbato y la fase adsorbente se llama adsorbente. El proceso inverso se denomina desorción.

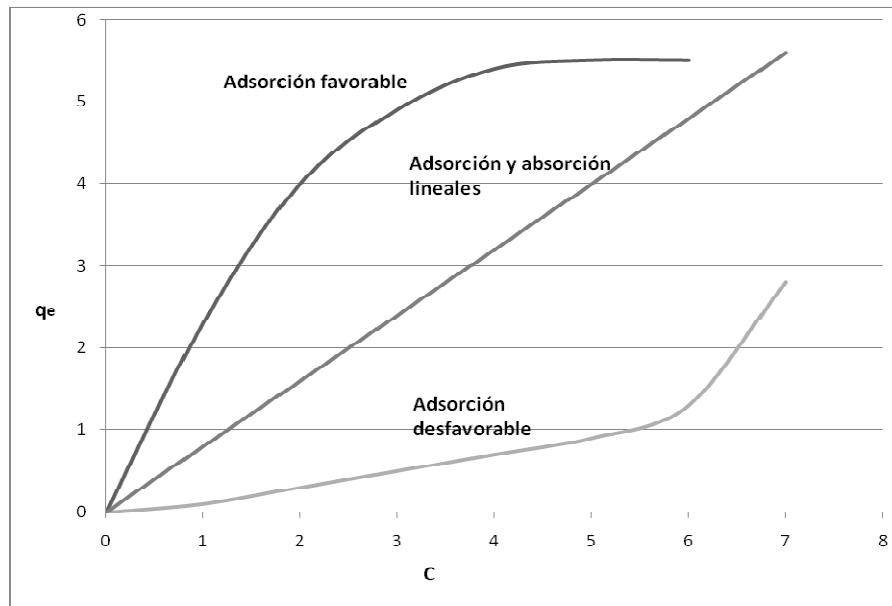
La adsorción se distingue de la absorción en que esta última implica a acumulación de la sustancia absorbida en todo el volumen del adsorbente, no solamente en la interfase.

El término sorción incluye la adsorción y absorción conjuntamente, es una expresión general para un proceso en el cual el componente se mueve desde una fase para acumularse en otra, principalmente en los casos en que la segunda fase es sólida. Las diferencias *entre adsorción y absorción se ilustran* en la figura 3, para los dos tipos de reacciones en que una sustancia se mueve desde una fase líquida hasta una sólida.

---

<sup>22</sup> Carl Eilhem Scheele (1742 – 1786). Químico farmacéutico sueco conocido, entre otras cosas, por el descubrimiento de muchos elementos y sustancias químicas, entre ellos el oxígeno de forma independiente, escrito en su único libro *Chemische Abhandlung Von Der Luft Un Dem Feuer* (Tratado químico del aire y del fuego), publicado en 1777.

Tuvo el mal hábito de probar los productos químicos que descubr



**Figura 3.** Tipos de separaciones por sorción.

La letra C en el eje de abscisas representa la concentración de la sustancia migrante en la fase líquida en contacto con la fase sólida, precisamente en la interfase. El término  $q_e$  del eje de ordenadas indica la cantidad de la sustancia que se ha trasladado a través de la interfase. Las curvas correspondientes a modelos de separación favorables y desfavorables, indican la dependencia curvilínea de la cantidad concentrada en la superficie sólida con la cantidad que permanece en la fase solución. La curva central representa un modelo de adsorción lineal, también para la absorción, que nos indica una dependencia directamente proporcional con la concentración.

### 1.6.2. Coagulación y Floculación

Las impurezas del agua varían en tamaño y aproximadamente en seis órdenes de magnitud, desde unos pocos angstroms para sustancias solubles hasta unos pocos cientos de micrones para materia en suspensión.

La eliminación de gran parte de estas impurezas se llevan a cabo por sedimentación, pero, debido a que muchas son demasiado pequeñas para eliminarse solamente por acción de la gravedad, es preciso llevar a cabo la agregación de estas partículas en agregados de mayor tamaño y más fácilmente decantables con el fin de obtener una separación satisfactoria por sedimentación. La acción de aglomerarse las partículas en suspensión, coloidales o no, es la coagulación, mientras que la floculación es la formación de los flóculos como consecuencia de la coagulación.

### 1.6.3. Filtración

Se utiliza para eliminar, en el tratamiento del agua residual, el flóculo biológico del efluente secundario decantado, precipitados obtenidos al precipitar fosfatos de las mismas, y los sólidos que permanecen después de la coagulación química de las aguas residuales en los procesos de tratamiento fisicoquímicos o

tratamiento posterior de éstas. Por supuesto, la filtración es función del medio filtrante empleado, adecuado según el objetivo determinado en cada caso.

#### 1.6.4. Intercambio iónico

Proceso en el cual los iones mantenidos por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales cargados situados en la superficie de un sólido, son cambiados por iones de carga similar en una disolución en la cual el sólido está inmerso. El intercambio iónico se considera como un proceso de sorción, debido a que los grupos funcionales cargados en los cuales ocurre el intercambio, están en la superficie del sólido, y porque los iones cambiables deben sufrir una transferencia de fase, desde una fase en solución hasta una fase superficial. Al igual que en el caso anterior, también depende del material de intercambio empleado.

#### 1.6.5. Procesos de membrana

En primer lugar, una membrana puede definirse como una fase que actúa como una barrera al flujo de especies moleculares o iónicas entre las fases que separa. La fase membrana es generalmente heterogénea. Esta fase puede ser un sólido seco, un gel empapado de disolvente, o un líquido inmovilizado. Para que la membrana actúe como un dispositivo útil de separación, debe transportar algunas moléculas más rápidamente que otras. Por tanto, debe tener una elevada permeabilidad para algunas especies y baja permeabilidad para otras, es decir, debe ser altamente permosselectiva. Los mecanismos de transporte a través de una membrana más característicos son:

- Ósmosis. Abbé Nollet (1700 – 1777) fue el primero que descubrió la ósmosis (1748), siguiendo las investigaciones Dutroelot (1827) y Karl Von Vierordt (1848). La ósmosis se define como el transporte espontáneo de un disolvente desde una solución diluida a una solución concentrada a través de una membrana semimpermeable ideal, que impide el paso del soluto pero deja pasar el disolvente. El flujo del disolvente puede reducirse si aplicamos una presión en el lado de la membrana. Para una cierta presión osmótica, se alcanza el equilibrio y la cantidad de disolvente que pasa en ambas direcciones es la misma. Si la presión en el lado de la solución se incrementa por encima de la presión osmótica, la dirección del flujo se invierte. Entonces el disolvente puro pasará desde la solución hasta el solvente.
- Electrodialisis. Según Svedberg<sup>3</sup>, Schwein fue el primero que utilizó este proceso para purificar unos extractos de azúcar, en 1900; pero la invención se le atribuye a Morse y Pierce (1903). En este proceso, la corriente eléctrica induce la separación parcial de los componentes de una solución iónica. Esta separación puede llevarse a cabo, colocando alternativamente membranas selectivas catiónicas y aniónicas al paso de la corriente. Cuando se aplica la corriente, los cationes son atraídos

---

<sup>3</sup> Theodor Svedberg (1884-1971), químico sueco y profesor universitario. Recibió el Premio Nobel de química en 1926 por sus trabajos sobre la fisicoquímica de los sistemas dispersos.

eléctricamente y pasan a través de la membrana de intercambio catiónico en una dirección, y los aniones cruzan a través de la membrana de intercambio aniónico en la otra dirección. Como resultado neto obtenemos alternativamente compartimientos de elevada salinidad y de baja salinidad a través de todo el paquete de membranas paralelas. Entonces el agua pasa a través de varios paquetes de membranas hasta que se obtiene la reducción de salinidad deseada.

#### *1.6.6. Oxidación - Reducción*

La oxidación química es un proceso en el cual se aumenta el estado de oxidación de una sustancia. Inversamente, la reducción química es un proceso en el cual se disminuye el estado de oxidación.

Para las reacciones inorgánicas simples redox, la oxidación equivale a una pérdida de electrones y la reducción a una ganancia. En el ámbito histórico, Lavoisier definió la oxidación como "la combinación de una sustancia química con el oxígeno para formar un óxido".

Clark (1960) atribuyó la oxidación de los compuestos orgánicos a las siguientes reacciones:

- Adición de oxígeno
- Pérdida de hidrógeno
- Pérdida de electrones, con o sin pérdida de protones

Sin embargo, la definición más corriente, aparte de la transferencia de electrones, es la transferencia de especies hidrogenadas y oxigenadas distintas del protón, óxido e ion hidroxilo, según Stewart (1964) y Turney (1965).

#### *1.6.7. Hidrólisis*

Es la descomposición de ciertas sustancias orgánicas e inorgánicas por acción del agua y a la inversa, la descomposición del agua por ciertas sales o sustancias orgánicas, siendo en todos los casos, el punto final de la hidrólisis.

La disolución de moléculas de gran tamaño se realiza mediante su hidrólisis por medio de enzimas extracelulares de las células bacterianas, transformando macromoléculas en unidades más pequeñas que pueden ser absorbidas a través de la membrana celular para poder ser metabolizadas.

Por hidrólisis, las proteínas se transforman en péptidos, las grasas en ácidos grasos y glicerina y los polisacáridos en azúcares.

#### *1.6.8. Sedimentación*

La acción de depositar la materia en suspensión presente en un líquido se llama sedimentación. En la velocidad de sedimentación influye el tamaño de las partículas y la densidad, tanto de la partícula como del medio.

## **1.7. Fundamentos microbiológicos**

En los procesos de tratamiento biológico de aguas residuales podemos encontrarnos con bacterias, algas, hongos, protozoos, rotíferos y crustáceos, que

nos facilitarán la coagulación de los sólidos en suspensión y la estabilización y/o eliminación de la materia orgánica disuelta, principalmente por acción de las bacterias.

En general, los microorganismos que intervienen en la depuración biológica de las aguas residuales se pueden clasificar en tres grupos:

- Animal. Organismos pluricelulares, con tejidos diferenciados. Los más representativos son los rotíferos y los crustáceos.
- Vegetal. Pluricelulares, con tejidos diferenciados, como hongos y helechos.
- Protistas. Unicelulares o pluricelulares sin tejidos diferenciados. Los protistas superiores son las algas, protozoos y hongos. Los protistas inferiores son las algas verde azules, las cianobacterias y lo popularmente conocido como bacterias.

Las bacterias son microorganismos unicelulares que se multiplican por escisión celular. Son las principales responsables de la mineralización de la materia orgánica y se encuentran dentro del grupo de protistas inferiores, unicelulares y sus dimensiones son aproximadamente de 0,5 – 1,5 micras de ancho por 10 micras de largo. Desde el punto de vista metabólico, se clasifican en:

- Autótrofas: las más frecuentes son quimiosintéticas, pocas son fotosintéticas
- Heterótrofas. Son las más interesantes en la depuración de las aguas residuales.

Como ya se ha comentado, pueden ser aeróbicas, anaeróbicas o facultativas, según sus necesidades de oxígeno.

En el desarrollo de las bacterias, la temperatura y el pH son muy importantes. El pH debe estar comprendido entre 4 y 9,5 y en cuanto a la temperatura, los márgenes son más estrictos.

La principal ventaja competitiva de las bacterias reside en su extraordinaria facultad metabólica, adaptándose a condiciones ambientales y sustratos orgánicos muy variados. A esto se debe la gran difusión del género *Pseudomonas* en las plantas de tratamiento de las aguas residuales.

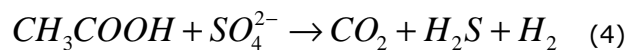
Las bacterias pueden dividirse en dos grupos.

- Cianobacterias o algas verdes azules. Diversos microorganismos que tradicionalmente han sido considerados como bacterias. Algunos de estos microorganismos clasificados como bacterias son muy similares en tamaño y forma a las bacterias verdes azules, y tienen un tipo semejante de desplazamiento motil. No son fotosintéticas y pueden tener su origen en bacterias azul verdes que han perdido la facultad de formar clorofila. La mayor parte de las bacterias son organismos unicelulares, de morfología muchos más simple y tamaño muchos más pequeño que la mayoría de las bacterias verde azules.
- Diversos microorganismos que tradicionalmente han sido considerados como bacterias. Algunos de estos microorganismos clasificados como bacterias son muy similares en tamaño y forma a las bacterias azul verdes, y tienen un tipo semejante de desplazamiento motil. No son fotosintéticas y pueden tener su origen en bacterias azul verdes que han perdido la facultad de formar clorofila. La mayor parte de las bacterias son

organismos unicelulares, de morfología mucho más simple y tamaño mucho más pequeño que la mayoría de las bacterias verde azules.

En ambientes anaerobios se encuentran principalmente los siguientes grupos de bacterias:

- Bacterias formadoras de ácidos son organismos saprobios heterótrofos, anaerobios facultativos, siendo los principales: *pseudomonas*, *alcalígenes*, *flavobacterium*, *escherichia* y *aerobacter*. Se encuentran en ambientes anaerobios, dependiendo del pH, siendo los ácidos que forman con mayor frecuencia el acético, propiónico y butírico.
- Bacterias metanogénicas. Todas las bacterias productoras de metano se incluyen en la familia Metanobacteriáceas. Los progresos sobre el conocimiento del metabolismo de estos organismos han sido muy lentos, debido a la dificultad de obtener cultivos puros y que es muy difícil trabajar con ellos debido a su extremada sensibilidad para el oxígeno, para las cuales es veneno. Son anaerobias estrictas. La característica más común de las bacterias metanogénicas y de otras bacterias litotróficas, es el uso de hidrógeno como fuente de energía, y el dióxido de carbono como aceptor de electrones. Este modo de generación de energía se ajusta a los definidos como quimiolitotrofos. Las bacterias metanogénicas juegan un papel importante en el circuito degradativo del ciclo del carbono, y utilizan como sustrato, para generar metano, el producto de degradación de las bacterias formadoras de ácidos.
- Las bacterias sulforreductoras reducen los sulfatos o sulfuros, para lo cual se requieren 8 electrones, siendo el acetato la fuente de los mismos. La reacción se realiza de acuerdo con la ecuación:



Esta reacción es realizada por organismos sulforreductores como el *desulfuromonas acetoxidans*, siendo el producto final más abundante el sulfuro de hidrógeno. En la zona anaerobia también pueden encontrarse otras bacterias reductoras de los sulfatos, como el *Desulfovibrio desulphuricans*. Crecen en ambientes reductores y son estrictamente anaerobias. Dependen de la reducción del sulfato como forma de metabolismo que genera energía.

- Las bacterias sulfooxidantes purpúreas (*Thiorhodaceae*, *Chromatiaceae*) son bacterias fotosintéticas responsables de la oxidación del sulfuro de hidrógeno a sulfato. Debido a que poseen pigmentos fotosintéticos especiales (rojo y rosa), que les permite utilizar longitudes de onda de la región roja e infrarroja del espectro, longitudes que las demás no pueden utilizar, colorean, en ocasiones, las lagunas de tinte rosáceo. Entre las sustancias capaces de utilizar energía almacenada en estos compuestos de azufre situados en el punto más bajo de reducción, oxidándolos a sulfatos, se encuentran organismos quimiolitotrofos como el *Thiobacillus*, *Beggiatoa* y *Thiotrix*, así como los fotótrofos verdes y bacterias púrpura del azufre como el *Clorobium* y *Rodospirillum*. La ausencia de luz impide la actividad de los fototrofos y los quimiolitotrofos, que requieren condiciones con concentraciones muy bajas de oxígeno (microóxicas). Como resultado de

esto, si la concentración de cualquier sulfato o el dador de electrones es muy alta, entonces se produce H<sub>2</sub>S.

- Las bacterias capaces de fijar el nitrógeno atmosférico son, con excepciones, formas filamentosas con células diferenciadas.

Por otra parte, existen una serie de transformaciones bioquímicas que oxidan el amoniaco a ión nitrato mediante la nitrificación y viceversa, reducen los nitratos a amonio mediante la desnitrificación.

En medio oxidante, el ión amonio se transforma en nitrito, pasando por hiponitrito, por la acción de las bacterias nitrificantes del género nitrosomonas (se acepta como norma general que las bacterias nitrificantes utilizan como sustrato el ión amonio con preferencia al amoniaco), mientras que el paso de nitrito a nitrato es realizado por las bacterias del género nitrobacter.

En el ciclo completo del nitrógeno, los iones nitrito y nitrato son reducidos, por acción bacteriana (desnitrificación) al estado de nitrógeno gas o amoniaco. Las bacterias desnitrificantes son anaerobias facultativas, y realizan su metabolismo respiratorio utilizando como aceptores finales de electrones iones nitrato, sulfato y carbonato (*micrococcus desnitrificans*, *thiobacillus desnitrificans* o *pseudomona sp.*)

- Las bacterias patógenas (*salmonella*, *shigella*, *leptospira*, *escherichia*, etc.), tienen su hábitat normal en el organismo humano, por lo que son incapaces de desarrollarse en agua, considerándose como indicadores de contaminación fecal.

Las más frecuentes empleadas como indicadoras de contaminación fecal son:

- o Coliformes: agrupa de *Escherichia coli*, *E.intermedium*, *E.freundii*, *aerobacter aerógenes* y *a. cloacae*.
  - o Estreptococos, que indica, aún en ausencia de *E.coli*, contaminación fecal de origen reciente.
  - o Anaerobios esporulados. Las esporas de *clostridium welchii* le permiten sobrevivir mucho tiempo en condiciones ambientales adversas, por lo que su presencia en agua es indicio de una contaminación fecal, y en ausencia de coliformes fecales se puede suponer con fundamento que la contaminación tuvo lugar hace tiempo.
- El fitoplancton abarca todos los organismos autótrofos presentes en el agua: las algas. Contribuyen, junto con las bacterias, a la estabilización de la materia orgánica presente en las aguas residuales.

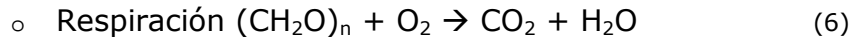
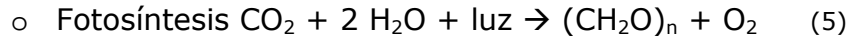
Las algas son protistas unicelulares o pluricelulares, móviles o inmóviles, autótrofas (no todas), sin tejidos diferenciados y su reproducción se realiza por esporas, sexual, con gametos masculinos y femeninos. Poseen un pigmento verde, la clorofila, que es esencial para la realización de la fotosíntesis, para sintetizar sustrato orgánico a partir de materiales inorgánicos, descomponiendo el CO<sub>2</sub>, asimilando el carbono y liberando el oxígeno. Son divididas, generalmente, en tres grandes grupos, basados en



el color que tienen sus células debido a la clorofila y otros pigmentos implicados en la fotosíntesis: las verdes, pardas y rojas.

Por otra parte, las algas respiran, oxidando, mediante el oxígeno libre que tomen del aire, los compuestos orgánicos para obtener energía para su metabolismo, desprendiendo anhídrido carbónico.

Los dos procesos de las algas:



Los organismos consumidores (zooplancton) ingieren dicho sustrato, mientras que los descomponedores (bacterias y hongos) reducen el material orgánico a constituyentes inorgánicos básicos, cesando así el ciclo trófico.

La presencia de distintas especies de algas depende de sus necesidades fisiológicas y de los factores de medio en que se encuentran: temperatura, horas de sol, pluviometría, turbulencia, etc.

Todas las especies tienen unos rangos óptimos de desarrollo, de acuerdo con las características físicas indicadas. Hay que resaltar que no todas las algas tienen igual eficacia en la conversión de la energía lumínica. Por otra parte, se presenta, a veces, el efecto sombra, cuando determinadas especies de desarrollan extraordinariamente, impidiendo el paso de la luz a otras especies.

La turbulencia influye en las poblaciones algales móviles (diatomeas). Cuando no hay turbulencia, estas algas tienen a sedimentar, alejándose de la zona iluminada.

Las comunidades fitoplanctónicas pueden coexistir diversos grupos de algas debido a la variabilidad de los factores ambientales.

La presencia de fitoplancton es extraordinariamente importante en la depuración de las aguas por medio de lagunas, ya que la realizar la función clorofílica, toman el anhídrido carbónico disuelto en las aguas, absorbiendo el carbono y desprendiendo oxígeno, el cual es utilizado por las bacterias aerobias y heterótrofas.

Las algas, además del  $\text{CO}_2$ , necesitan otros compuestos inorgánicos para desarrollarse, en especial nitrógeno, fósforo y algunos otros elementos en cantidades traza (oligoelementos) como hierro, cobre, etc. Los nutrientes principales para el desarrollo del fitoplancton son el carbono, nitrógeno y fósforo. El carbono se encuentra siempre en abundancia en las aguas residuales con materias orgánicas biodegradables. No así el nitrógeno y fósforo. Por este es importante la relación N/P del agua, ya que va a determinar un tipo y otro de poblaciones algales.

Desde el punto de vista biológico, dos son los hechos que pueden modificar la composición de las poblaciones: la depredación y la competencia interespecífica.

Entre los tipos de algas más importantes presentes en las aguas dulces, tenemos:

- Verdes (clorofitas). Pueden ser unicelulares o pluricelulares. Poseen cloroplastos. Del grupo *Chlorella*
- Verdes móviles (*volvoales euglenophyta*). De color verde brillante, unicelulares y flageladas y viven en colonias.
- Verdes amarillas o marrón dorado (*chtysophita*). La mayoría son unicelulares. Su color característico es debido a los pigmentos pardo amarillentos que contienen la clorofila. Las más importantes son las diatomeas.
- Verdes azuladas (*cianofitas*). Son muy simples, y en muchos aspectos, parecidas a las bacterias. Su clorofila no está contenida en los cloroplastos, sino que está repartida por toda la célula. Utilizan como nutriente el nitrógeno atmosférico.
- Se denomina zooplancton al conjunto de microorganismos animales que viven en el seno de las aguas. Estos organismos están adaptados funcionalmente al medio, en relación con su alimentación y movimiento. Entre ellos se encuentran:
  - Protozoos: son protistas móviles, por lo general unicelulares. La mayoría son aerobios, heterótrofos y suelen consumir bacterias y partículas orgánicas como fuente de energía. Pueden moverse mediante cilios, flagelos y pseudópodos. Suelen dividirse en cinco grupos:
    - Sarcodina (entamoeba histolytica)
    - Mastigophora (euglena, astasia)
    - Esporozoario (plasmodium)
    - Infusorios o ciliados (paramecium, ciliado libre, vorticela, ciliado rojo)
    - Suctoria
  - Rotíferos: son multicelulares, aerobios y heterótrofos, de tamaño inferior a 0,5 mm, teniendo gran eficacia en el consumo de bacterias floculadas y dispersas de las que se alimenta, así como fitoplancton y pequeñas partículas de materia orgánica en suspensión, llegando a comer 10 veces su peso por día. Su presencia indica alto grado de eficacia en el proceso de depuración. Existen especies depredadoras y carnívoras. Las primeras controlan los niveles de población de formas más inferiores, influyendo por tanto en la sucesión de especies dominantes.
  - Crustáceos: son aerobios, heterótrofos y multicelulares, no están presentes en los sistemas de tratamiento biológico excepto en lagunas de oxidación de muy baja carga. Su presencia indica que el efluente es escaso en materia orgánica y alto contenido en oxígeno disuelto.
  - Hongos: son protistas heterótrofos, no fotosintéticos, multicelulares. Se suelen clasificar por su modo de reproducción, sexual o asexual, por escisión, gemación o formación de esporas. La mayoría de los hongos son aerobios estrictos. Su capacidad para sobrevivir en

ambientes de bajo pH los convierte en agentes de gran importancia en el tratamiento biológico de las aguas residuales industriales ácidas.

### *1.7.1. Cinética de crecimiento biológico*

La riqueza de las depuradoras biológicas es función de la heterogeneidad del medio, el cual es colonizado por una serie de poblaciones animales y vegetales, cuya estructura debe responder, en condiciones normales, a un cierto equilibrio dinámico.

En los organismos pluricelulares, la multiplicación de las células determina al aumento del tamaño del individuo, en tanto que en los unicelulares, éste hecho determina un aumento de individuos, por lo que el crecimiento de la población depende del crecimiento celular.

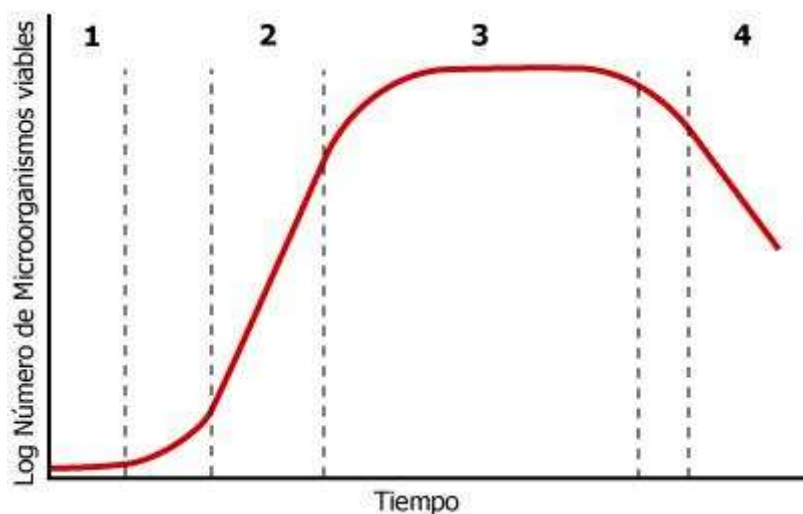
Desde el punto de vista biológico, se considera que son viables (están vivos) aquellos organismos que conservan su capacidad reproductora y muertos o inviables los que han perdido esa capacidad. La muerte representa la pérdida irreversible de la capacidad de un organismo o una célula para reproducirse a sí mismo.

Desde que el número de células se duplica en cada generación, la población total aumenta exponencialmente en base 2.

Una consecuencia de la naturaleza exponencial del crecimiento de los organismos unicelulares es que cada unidad de tiempo, la población se multiplica por un factor constante.

Pero este crecimiento exponencial de las bacterias no continúa indefinidamente, debido al consumo y por tanto agotamiento de los nutrientes presentes en el medio o por acumulación de sustancias tóxicas, como los catabolitos. Por tanto, el desarrollo de las poblaciones bacterianas es autolimitante.

En la curva de crecimiento de un cultivo bacteriano se pueden observar cuatro fases principales:



**Figura 4.** Curva de crecimiento de cultivo bacteriano

- Fase de latencia, primera etapa: después de la inoculación de un organismo en un medio, transcurre un tiempo más bien breve, antes de que se inicie el crecimiento exponencial. En esta fase, los organismos inoculados sufren un periodo de intensa actividad metabólica (periodo de adaptación), durante el cual se adaptan a la condiciones del medio. Se trata por tanto de un periodo de ajuste metabólico.
- Fase de crecimiento exponencial, segunda fase: los organismos crecen exponencialmente. Cada organismo produce dos individuos hijos. El tiempo de generación puede ser de 20 o 30 minutos para algunas bacterias, hasta varios días en el caso de microorganismos de crecimiento lento. La velocidad de crecimiento de un organismo está frecuentemente limitada por la disponibilidad de nutrientes adecuados.
- Fase estacionaria, tercera fase: permanece aproximadamente constante el número de organismos del cultivo. La duración de esta fase es variable. En muchos casos, el número total de células de cultivo se mantiene constante e igual al número viable durante la fase estacionaria, siendo esta la regla general de los cultivos cuya fase estacionaria se produce como consecuencia del agotamiento completo de un determinado nutriente.
- Fase de muerte, última etapa: en esta fase el número viable decrece. La velocidad estadística de muertes, que es cero durante la fase estacionaria máxima, empieza a aumentar y finalmente alcanza un valor máximo constante. Tras alcanzar una velocidad de muerte constante, el cultivo muere exponencialmente. Una vez que la mayoría de las células han muerto, la velocidad de esta fase disminuye, de tal suerte que durante meses e incluso años, pueden persistir en el cultivo un número constante de células vivas. Este fenómeno parece ser debido al crecimiento continuado de una fracción muy pequeña de células a expensas de los nutrientes que se liberan en la descomposición lenta de los individuos muertos. En muchos cultivos la pérdida de viabilidad va acompañada de una rápida disminución del número de organismos vivos. En otros casos, este número permanece constante durante mucho tiempo. Esta diferencia de conducta se debe a que las células muertas pueden ser descompuestas rápidamente por la acción de las propias enzimas que se liberan al morir. El proceso de autodigestión se conoce como autólisis.

### 1.7.2. Relaciones interespecíficas

Los microorganismos, en su hábitat natural, rara vez se encuentran como especies puras, sino que se asocian con otras especies.

Estas asociaciones se pueden realizar entre diferentes especies bacterianas o entre diversas clases de organismos, como levaduras, mohos, algas, protozoos, plantas e incluso animales superiores.

Los distintos tipos de asociación que se realiza entre las bacterias con los organismos que las rodean son:

- Simbiosis: es la vida común de dos o más especies de microorganismos asociados en beneficio mutuo. Son muy corrientes la simbiosis entre bacterias y otras formas de vida.

- Comensalismo: es una asociación en que una especie se beneficia en tanto que la otra ni se beneficia ni recibe perjuicios.
- Sinergia: es la acción cooperante de dos factores con efecto total mayor que la suma de los efectos separados.
- Parasitismo: depende los hábitos de alimentación. El parasitismo se beneficia a expensas del huésped, pero en su metabolismo produce sustancias tóxicas para él mismo.
- Antibiosis: muchos microorganismos son nocivos para otros. A este fenómeno se le denomina antibiosis. La acción antibiótica es causada por la excreción de productos tóxicos de desecho, como alcoholes, ácidos y otras sustancias tóxicas más complejas, denominadas antibióticos.

### 1.7.3. Efectos ambientales

Los microorganismos son introducidos constantemente en el ambiente y debido a su pequeño tamaño, son fácilmente dispersados en el mismo, donde tienen facilidad para desarrollarse. Los cambios en las condiciones ambientales pueden producir cambios rápidos en relación con las diferentes especies.

De aquí la necesidad de conocer los factores físicos y nutricionales que afectan al crecimiento microbiano en general, y de las especies individuales en particular, para predecir el tipo de organismos que puede esperarse predominen en determinados ambientes, y tomar medidas para cambiar la población hacia tipos más deseables o usuales.

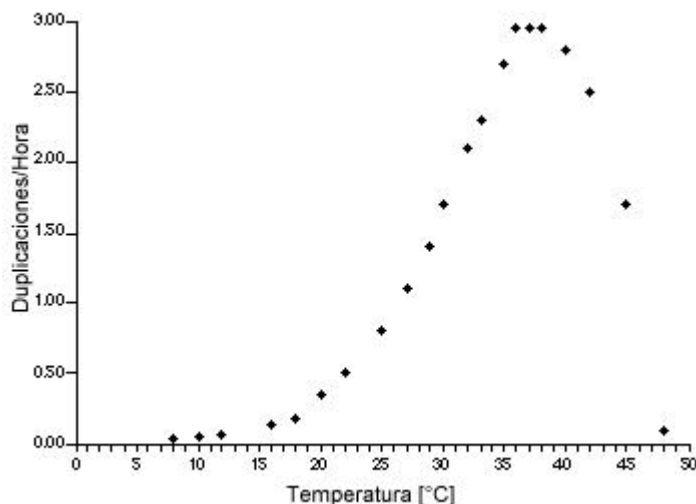
El ambiente físico en que se encuentran los microorganismos tiene gran influencia en la velocidad de crecimiento de los mismos, actuando como agentes selectivos. Los factores químicos pueden ser selectivos o no. De aquí que, para asegurar la eficiencia de una nueva depuración de aguas residuales con materia orgánica biodegradable, se debe proporcionar un ambiente adecuado, dentro de las posibilidades, para cada proceso de tratamiento biológico, o dicho de otra manera, muchas veces debe elegirse el tratamiento a realizar de acuerdo con las características ambientales imperantes, ya que no hay un único procedimiento para el tratamiento y depuración de las aguas.

- Temperatura. Los microorganismos no pueden controlar su temperatura interna, siendo por tanto la temperatura ambiente la que determina la temperatura de la célula.

Para describir el aumento de la velocidad de reacción con la temperatura, se cita frecuentemente la aproximación conocida como regla de *Van 't Hoff* o del  $Q_{10}$  que establece que la velocidad de reacción aumenta al doble para un aumento de la temperatura de 10°C dentro de las condiciones normales de vida.

Basado el rango de temperatura al cual proliferan, las bacterias pueden ser clasificadas en *psicofílicas*, *mesofílicas* y *termofílicas* con intervalos de temperatura de -5 a 30 °C (óptimo de entre 12 y 18 °C) para las primeras, 10 a 45 °C (óptimo entre 25 y 40 °C) para las segundas y 25 a 80 °C (óptimo entre 50 y 60 °C) para las terceras.

La siguiente imagen muestra el aumento de la duplicación de las bacterias mesófilas en función de la temperatura.



**Figura 5.** Variación del número de microorganismos en función de la temperatura.

La variación de temperatura afecta a magnitudes físicas como la solubilidad de los gases en agua, la densidad, viscosidad, tensión superficial, presión de vapor, etc., y también afecta la estabilidad de las proteínas celulares porque induce cambios conformacionales que alteran la actividad biológica de estos compuestos, especialmente la de enzimas, y a parámetros como la sedimentación, desplazamiento de equilibrios dinámicos, etc., así como a la velocidad de numerosas reacciones químicas.

Desde el punto de vista biológico, la temperatura del ambiente influye extraordinariamente en el desarrollo de los organismos que se encuentran en el seno del agua. Una temperatura elevada implica la aceleración de la putrefacción y por tanto del aumento de la demanda de oxígeno. Paralelamente disminuye la solubilidad de éste, pudiendo actuar la temperatura como un factor de control o como un factor letal. La temperatura óptima depende de cada especie, de la edad, de la estación, etc. Temperaturas superiores hacen que se sobreactiven los procesos de síntesis y catabolismo, adquiriendo estos últimos cierta preponderancia.

Para estudiar el efecto de la temperatura sobre una especie microbiana determinada, son usados comúnmente tres valores de temperatura: temperatura máxima, mínima y óptima. Las dos primeras definen el rango de temperatura en el cual es posible el crecimiento. La temperatura óptima suele estar mucho más cerca de la temperatura máxima que de la mínima. Estas temperaturas están relacionadas con la velocidad de crecimiento de los microorganismos y no con la producción máxima de células. Un aumento de temperatura por encima de la crítica destruirá el sistema enzimático del organismo.

Es tiempo es un factor importante en relación con la acción de la temperatura sobre el crecimiento de los microorganismos, particularmente

a temperaturas por encima del rango de crecimiento, siendo reversibles los efectos de algunas temperaturas elevadas, dependiendo del tiempo que actúen.

La temperaturas de las aguas residuales puede darnos una indicación del estado de las mismas en relación con la viscosidad, que influye en la velocidad de sedimentación, con la actividad biológica, la cual aumenta con la temperatura hasta los 60°C aproximadamente, con la solubilidad del oxígeno, etc. La temperatura normal de estas aguas es ligeramente superior a la del abastecimiento, como consecuencia del calor agregado durante la utilización de las mismas.

- pH. Influye en la velocidad de crecimiento y su limitación, o sea la acidez o alcalinidad del ambiente acuoso donde se encuentran los microorganismos.

Al igual que con la temperatura, cada especie microbiana está caracterizada por tres valores de pH, máximo y mínimo, que definen los límites de un rango dentro de los que es posible el crecimiento y el óptimo, que es el valor en el cual el crecimiento es el más rápido.

La mayoría de los microorganismos crecen a pH cercanos a la neutralidad, entre 5 y 9, cosa que no excluye que existan microorganismos que puedan soportar pH extremos y se desarrollen. Según el rango de pH del medio en el cual se desarrollan pueden dividirse en *acidófilos*, con pH externo entre 1,0 y 5,0 e interno de 6,5, *neutrófilos* con externo entre 5,5 y 8,5 e interno de 7,5, y por último, *alcalófilos*, con un pH externo entre 9,0 y 10,0 y pH interno de 9,5.

Se diferencia de la temperatura, en que los cambios de pH en el ambiente pueden ser causados, muchas veces, por los mismos microorganismos, ya que el pH interno de la célula no está determinado únicamente por el ambiente. En efecto, los microorganismos, al poder controlar el paso de iones, y por tanto de iones hidrógeno, a través de la membrana celular, hace que puedan ser indirectos los efectos de pH sobre la célula.

Aunque hay muchas excepciones, como regla general:

- La mayor parte de las bacterias tienen un pH óptimo cerca de la neutralidad y valor máximos y mínimos de crecimiento de 9 a 5 respectivamente.
- La mayor parte de los hongos tienen un valor mínimo entre pH 1 y 3 con un óptimo de 5.
- La mayor parte de las bacterias azul-verdes tienen un pH óptimo cerca de 5.
- La mayor parte de los protozoos tienen sus valores máximos y mínimos entre 8 y 5, con un óptimo de pH cerca de 7.

En los procesos de tratamiento biológico, la mayor parte de las bacterias se desarrollan en intervalos de pH entre 4 y 9, siendo el óptimo entre 6.5 y 7.5, es decir, que su óptimo se presenta cuando el pH es ligeramente alcalino.

Las algas y los hongos crecen mejor cuando el pH es ligeramente ácido. Ahora bien, raramente funcionan las estaciones depuradoras a pH

óptimos. Sin embargo, se ha encontrado que tanto las estaciones de tratamiento de lodos activados como en las lagunas aireadas, funcionan perfectamente a pH comprendidos entre 9.0 y 10.5. Sin embargo, estos mismos sistemas son muy vulnerables a pH inferiores a 6,0.

El rango de pH óptimo para el desarrollo de los microorganismos es estrecho debido a que frente a un pH externo muy desfavorable se requiere un gran consumo de energía para mantener el pH interno.

- Oxígeno. Los organismos se pueden clasificar en función del aceptor terminal de electrones en:

- *Aerobios estrictos*. Requieren oxígeno para su desarrollo, siendo este el aceptor final de la cadena respiratoria. Además de cómo aceptor terminal, para el cual requieren la mayor cantidad, estos organismos también requieren oxígeno, pero en cantidad mucho menor, para la realización de ciertas reacciones enzimáticas, como por ejemplo, la oxidación de hidrocarburos.
- *Anaerobios estrictos*. Crecen en ausencia total de oxígeno porque necesitan un medio muy reductor. Los aceptores terminales de electrones pueden ser, generalmente  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fumarato<sup>2-</sup> o  $\text{CO}_3^{2-}$ .



- *Anaerobios facultativos*, que pueden crecer en presencia o ausencia de oxígeno. Utilizan el oxígeno como aceptor final de electrones cuando está disponible, y en su ausencia, la energía la obtienen por fermentación.
- *Aerobios aerotolerantes*. Pueden crecer en presencia o ausencia de oxígeno, pero la energía la obtienen por fermentación.
- *Microaerófilos*. Sólo pueden crecer con bajas concentraciones de oxígeno (1 – 12 % de  $\text{O}_2$  gaseoso), ya que concentraciones mayores son tóxicas para este tipo de microorganismos. La energía la obtienen por respiración aeróbica, cuando no hay aceptores electrónicos terminales alternativos, o anaeróbica. Se desarrollan muy bien las aguas polucionadas, donde la concentración de oxígeno es muy baja, como el *Spherotilus natans*.

El oxígeno, en determinadas circunstancias, puede ser tóxico, aún para los aerobios estrictos, cuando es suministrado a presión mayor a la atmosférica.

El oxígeno ejerce un efecto selectivo sobre los microorganismos. De aquí que la disponibilidad de oxígeno en el ambiente sea un factor extremadamente importante en la selección de los organismos que lo pueblan.

En un hábitat sujeto a alternancias frecuentes entre condiciones aerobias y anaerobias, tienen una ventaja selectiva los anaerobios facultativos, ya que pueden desarrollarse en presencia o ausencia de oxígeno.



Al variar la concentración de oxígeno, los productos extracelulares de los organismos anaerobios facultativos pueden ser grandemente modificados, tanto cualitativa como cuantitativamente. Igualmente puede ser afectada la formación de enzimas extracelulares, aumentando en unos casos y disminuyendo en otros. Estos aspectos son extraordinariamente importantes en la hidrólisis de las macromoléculas y en la digestión anaerobia.

Se está investigando en profundidad sobre varios aspectos que tienen relación con la concentración de oxígeno presente en el medio, por ejemplo, la velocidad del consumo de oxígeno, producción de biomasa, composición celular, utilización de carbono soluble y coloidal, fuentes de energía, autodigestión, producción de enzimas específicas, formación de productos intermedios, etc.

Para los organismos aerobios capaces de existir en ambientes anaerobios, por ejemplo, anaerobios facultativos, la velocidad de consumo de oxígeno en la respiración aumenta con la concentración de oxígeno disuelto o con la agitación. Este consumo de oxígeno puede variar con las especies de microorganismos presentes y, para la misma especie, con la naturaleza de la fuente de carbono orgánico. Sin embargo, se observa la máxima velocidad en la respiración aeróbica a concentraciones bajas de oxígeno.

Influye poco sobre el incremento de la velocidad de la respiración aeróbica la concentración de oxígeno disuelto cuando se encuentra encima de la concentración crítica.

La concentración crítica de oxígeno disuelto es menor de 0.1 mg/l. Por encima de este nivel, su concentración no afecta notablemente la intensidad de respiración. Para proporcionar en las plantas depuradoras un factor de seguridad, se recomienda mantener una concentración de 2.0 mg/l. Por encima de los niveles críticos de oxígeno disuelto, aumenta ligeramente la respiración y disminuye la biomasa producida, según se ha observado en sistemas donde aumentaron respectivamente el oxígeno disuelto y la agitación. La tendencia a aumentar la agitación y por tanto la mezcla a un valor alto, mientras varía la concentración de oxígeno disuelto por encima del rango crítico (1,4 a 7,1 mg/l), no se produce un cambio notable en la velocidad de respiración o en la producción de células.

- Actividad del agua. El agua es el solvente en donde ocurren las reacciones químicas y enzimáticas de la célula y es indispensable para el desarrollo de los microorganismos.

La actividad de agua ( $a_w$ ) del medio representa la fracción molar de las moléculas de agua totales que están disponibles, y es igual a la relación que existe entre la presión de vapor de la solución respecto a la del agua pura. El valor mínimo de  $a_w$  en el cual las bacterias pueden crecer varía ampliamente, pero el valor óptimo para muchas especies es mayor a 0.99. Algunas bacterias halófilas (bacterias que se desarrollan en altas concentraciones de sal) crecen mejor con  $a_w = 0.80$ .

Variaciones en la actividad de agua pueden afectar la tasa de crecimiento, la composición celular y la actividad metabólica de los microorganismos, debido a que si no disponen de suficiente cantidad de agua libre en el

medio necesitaran realizar más trabajo para obtenerla y disminuirá el rendimiento del crecimiento.

- Potencial redox. El Potencial redox es una medida de la tendencia del medio a donar o recibir electrones. Es crítico para el crecimiento de los microorganismos y generalmente está asociado con la presencia de oxígeno molecular disuelto en el medio, el cual es muy oxidante. En medios que contienen oxígeno, en condiciones similares a las atmosféricas, el potencial redox varía entre 0,2 y 0,4 V. Los anaerobios estrictos necesitan una atmósfera sin oxígeno, pues deben crecer en medios reductores donde el potencial no sea mayor a -0,2 V. Sin embargo, potenciales redox positivos creados por la presencia de otras sustancias químicas no afectan el crecimiento de los anaerobios más estrictos, aunque muchos anaerobios estrictos son inhibidos por potenciales mayores a -0.100 mV.
- Carbono. Este elemento puede aportarse a los microorganismos en forma muy diversa dependiendo del tipo de metabolismo que posean. El carbono es utilizado por los microorganismos para sintetizar los compuestos orgánicos requeridos para las estructuras y funciones de la célula.

Los microorganismos se pueden dividir en categorías nutricionales en base a dos parámetros: naturaleza de la fuente de energía y naturaleza de la fuente principal de carbono.

- o *Fototrofos*, que utilizan luz como fuente de energía
- o *Quimiotrofos*. La fuente de energía es química
- o *Autotrofos*, que utilizan como fuente de carbono el CO<sub>2</sub> a partir del cual sintetizan la materia orgánica, tal como se ha explicado
- o *Heterótrofos*. Utilizan compuestos orgánicos como fuente de carbono.

Combinándose estos dos parámetros se pueden establecer cuatro categorías principales de organismos:

- o *Fotoautótrofos*, que dependen de la luz como fuente de energía y utilizan CO<sub>2</sub> como principal fuente de carbono. Son vegetales superiores, bacterias fotosintéticas, algas eucariotas, etc.
- o *Fotoheterótrofos*: utilizan la luz como fuente de energía y emplean compuestos orgánicos como fuente de carbono. Son algunas bacterias fotosintéticas y algas eucariotas.
- o *Quimiautótrofos*, que emplean CO<sub>2</sub> como fuente de carbono y utilizan fuentes de energía química proveniente, generalmente, de compuestos inorgánicos reducidos como H<sub>2</sub>, S<sup>2-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, etc.
- o *Quimioheterótrofos*, que emplean compuestos orgánicos como fuente de carbono y energía. Los compuestos orgánicos también se comportan como fuente de electrones. Este grupo está integrado por animales superiores, hongos, protozoos y la mayoría de las bacterias.

- Nitrógeno. El nitrógeno es utilizado por las bacterias para formar aminoácidos, pirimidinas, purinas, etc., y puede provenir de diferentes fuentes:
  - o Asimilación de  $\text{NH}_3$  y sales de amonio. El nitrógeno es transferido con este estado de oxidación a los aminoácidos por la vía de la glutamato/glutamina.
  - o Fijación del nitrógeno. El  $\text{N}_2$  es reducido dentro de la célula a  $\text{NH}_4^+$  y metabolizado.
  - o Reducción asimiladora de nitratos. Los nitratos son reducidos dentro de la célula por la vía de los nitritos a amoníaco y metabolizado.
  - o Hidrolizados proteicos. Los microorganismos incapaces de asimilar el nitrógeno de sales inorgánicas, lo obtienen a través de compuestos orgánicos nitrogenados como los hidrolizados proteicos. Estos compuestos proteicos son a su vez hidrolizados por enzimas bacterias, fuera de la célula, a aminoácidos, los que después son metabolizados dentro de la célula.
- Azufre. El azufre puede ingresar en la célula reducido (grupos sulfhidrilos), como sulfato (debe ser reducido dentro de la célula para metabolizarse) o como aminoácidos azufrados. El azufre es utilizado para la síntesis de aminoácidos azufrados como la cisteína o metionina, que tienen un papel muy importante en la estructura terciaria de las proteínas (formación de puentes S-S) y en el sitio catalítico de enzimas.
- Factores de crecimiento. Son compuestos orgánicos que el microorganismo es incapaz de sintetizar a partir de los nutrientes y son fundamentales para la maquinaria metabólica de la célula. Son vitaminas, aminoácidos, purinas, pirimidinas, etc.

En relación al requerimiento de factores de crecimiento los microorganismos se pueden dividir en:

- o *Protótrofos*. Microorganismos que sintetizan sus propios factores de crecimiento.
  - o *Auxótrofos*. Microorganismos que requieren de una fuente externa de factores de crecimiento debido a que son incapaces de sintetizarlo.
- Iones inorgánicos. Son esenciales para el crecimiento porque estabilizan los compuestos biológicos como enzimas, ribosomas, membranas, etc. Los iones requeridos para el crecimiento bacteriano son aportados en el medio a través de sales que contienen  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  y trazas de  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$  y  $\text{Zn}^{2+}$ .

## 1.8. Fundamentos metabólicos

El metabolismo es el conjunto de todas las reacciones químicas que suceden en el interior de las células, por medio de las cuales procesan los alimentos para obtener energía y nuevos compuestos que serán los componentes de la nueva célula.

En el metabolismo, las reacciones químicas están encadenadas, de forma que el producto de una reacción es el sustrato o metabolito de la siguiente. Por otra parte, cada uno de los conjuntos de reacciones encadenadas que constituyen el metabolismo recibe en nombre genérico de vía o ruta metabólica.

Las vías metabólicas que comportan la síntesis de biomoléculas orgánicas a partir de moléculas más sencillas reciben globalmente en nombre de anabolismo. Las vías metabólicas que rompen o degradan biomoléculas orgánicas para la obtención de energía útil para las actividades celulares, constituyen el catabolismo, y tienden a producir anhídrido carbónico.

### 1.8.1. Características de las reacciones metabólicas

En las reacciones metabólicas como en cualquier reacción química, en primer lugar se forman nuevas sustancias (los productos a partir de los reactivos o metabolitos) y en segundo lugar, durante la reacción, hay un intercambio de energía entre los compuestos reaccionantes y el medio que las rodea.

Pero además de estas dos propiedades generales de todas las reacciones químicas conocidas, debemos señalar que:

- Las reacciones metabólicas suceden en un medio acuoso; en consecuencia, los reactivos y los productos se encuentran en disolución. El agua es, además, un reactivo o un producto de algunas reacciones metabólicas.
- Las reacciones metabólicas, como ya hemos indicado anteriormente, están encadenadas y la mayoría están acopladas, de manera que la energía liberada en una de las reacciones, que llamamos exergónica<sup>4</sup>, es captada por otra reacción, endergónica, que requiere energía.
- Cada reacción metabólica tiene su catalizador o enzima. En general, los catalizadores y las enzimas en particular, son sustancias que aceleran las reacciones químicas porque disminuyen la energía de activación de la reacción.
- En las reacciones acopladas, una misma enzima cataliza las dos reacciones a la vez.

Hemos de recordar que, desde una perspectiva energética en toda reacción química es necesaria la aportación de una energía inicial o de activación para que se inicie la reacción, independientemente de que la reacción se espontánea y vaya acompañada de una liberación de energía en forma de calor (reacción exotérmica) o que se trate de una reacción que se realiza con absorción de energía en forma de calor (reacción endotérmica).

Los tipos de reacciones metabólicas más frecuentes en las células son:

- Reacciones de oxidación reducción (redox) o de transferencia de electrones. Una oxidación es una pérdida de electrones y una reducción

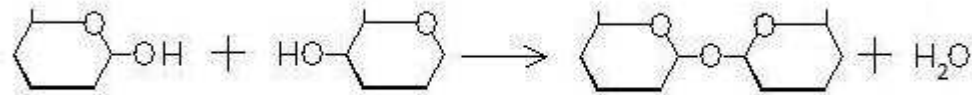
---

<sup>4</sup> Se define como Energía libre (G) a la energía que está contenida en las sustancias que participan en una reacción. En las transformaciones químicas espontáneas, los productos finales contienen menos energía libre que los reactivos iniciales, es decir, la variación de energía libre que representamos como  $\Delta G$ , es negativa; estas reacciones son las que denominamos exergónicas. En cambio, en una reacción endergónica,  $\Delta G > 0$ .

una ganancia de electrones. En los procesos metabólicos las transferencias de energía van asociadas con frecuencia a reacciones de este tipo:

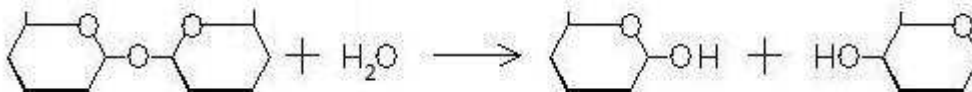


- Reacción de condensación que conllevan la formación de una moléculas compleja a partir de metabolitos más simples; en muchas de estas reacciones se produce la formación de moléculas de agua:



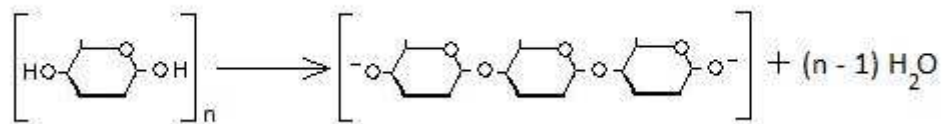
**Figura 6.** Reacción de condensación general

- Reacciones de hidrólisis, inversas de las reacciones de condensación:



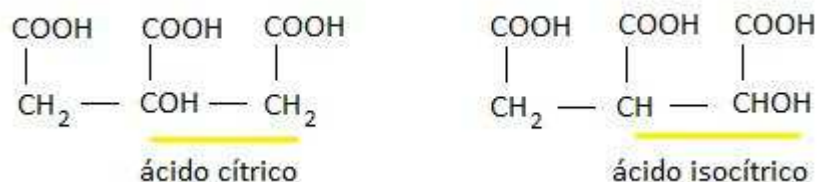
**Figura 7.** Reacción de hidrólisis general

- Reacciones de polimerización. Son las reacciones de unión de monómeros para formar macromoléculas o polímeros:



**Figura 8.** Reacción de polimerización general

- Reacciones de isomerización o reacciones de ordenación interna de los átomos de una molécula para formar un isómero o sustancia de igual fórmula empírica pero con estructura molecular diferentes:



**Figura 9.** Ejemplo de isomerización

- Reacciones de transferencia de grupos de átomos de una molécula a otra. Las más frecuentes son las reacciones de fosforilación o de incorporación de grupos fosfato a un metabolito, y las reacciones inversas o de desfosforilación:

Fosforilación: glucosa + ATP → glucosa 6 -fosfato + ADP

La mayor parte de todas estas reacciones tienen por objeto aprovechar la energía almacenada en los alimentos.

Los productos químicos principales que aportan energía a las células son el oxígeno, hidratos de carbono, grasas y proteínas. Por hidrólisis, prácticamente todos estos carbohidratos se transforman en glucosa, las proteínas en aminoácidos y las grasas en ácidos grasos y glicerina.

Dentro de las células, los productos sirven de alimento a las mismas, reaccionan químicamente con el oxígeno, reacción catalizada por diversas enzimas, que controlan la intensidad de las reacciones y llevan en dirección apropiada la energía liberada.

### 1.8.2. Degradación aeróbica

Los organismos vivos utilizan para su desarrollo, además de minerales y vitaminas, hidratos de carbono, grasas y proteínas. Pero ninguno de ellos puede absorberse en su estado natural hasta que no sean hidrolizados (digeridos) siendo transformados en compuestos solubles para poder ser absorbidos.

Por tanto, la hidrólisis es el mecanismo principal de la digestión, transformando los carbohidratos, normalmente polisacáridos y disacáridos, en monosacáridos, los lípidos en, que suelen encontrarse como grasas neutras, triglicéridos, fosfolípidos y colesterol, se hidrolizan a ácidos grasos y glicerina, con la presencia de 3 moléculas de agua y una de triglicérido, y por último, las proteínas, unidas por enlaces peptídicos, se digieren a aminoácidos, en presencia de agua.

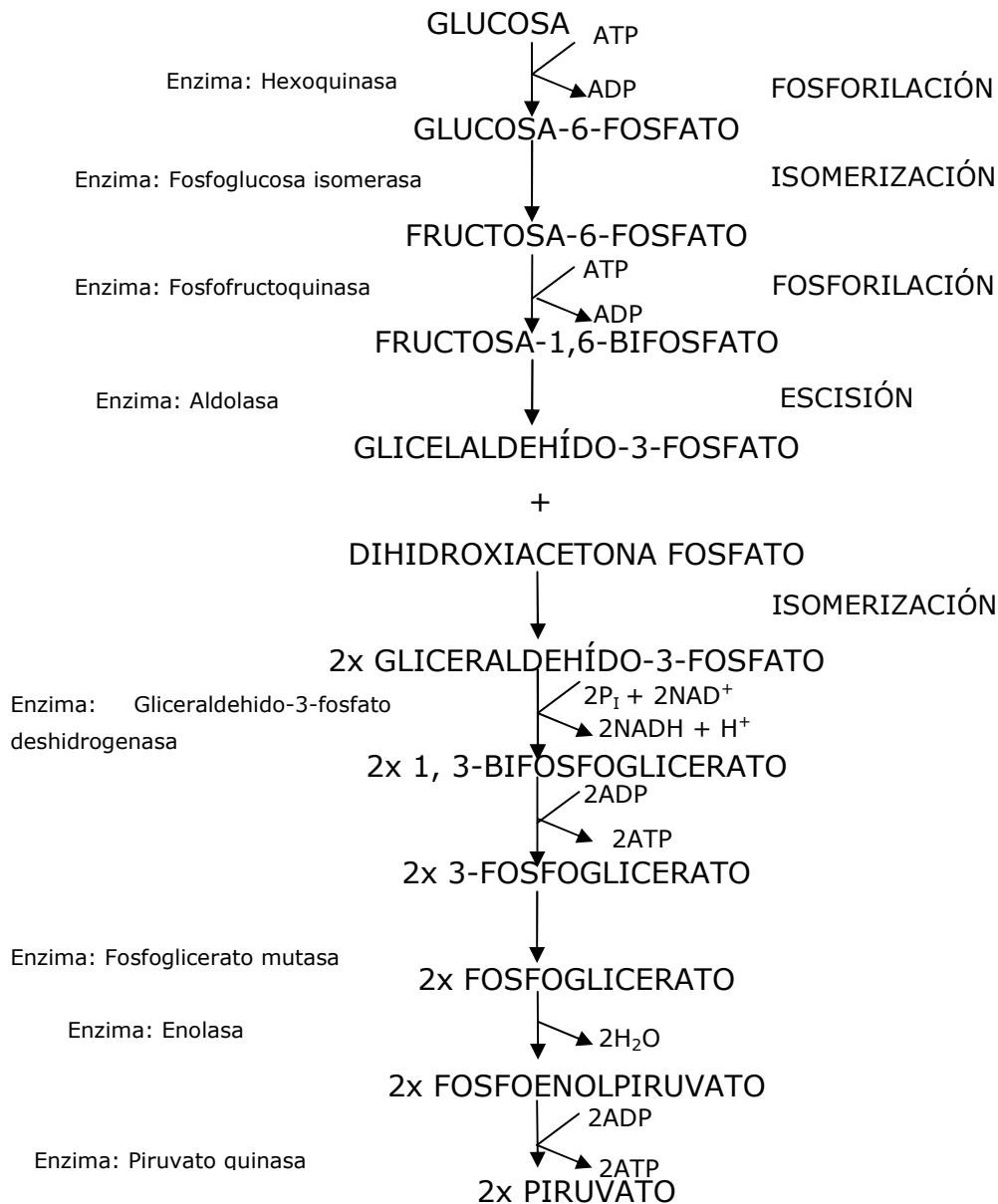
El sustrato más rápido y fácilmente utilizable son los hidratos de carbono, cuyo producto final de la hidrólisis es la glucosa, que tiene varios destinos.

La glucosa como sí, una vez en el organismo, puede almacenarse para necesidades futuras en forma de glucógeno y almidón, fundamentalmente, o bien puede oxidarse para obtener energía; esta oxidación puede ser por la vía de las pentosas, obteniendo Ribosa-5-P, o bien por glucolisis, obteniendo piruvato, siendo este último, transformado en varios productos según las condiciones del medio y las necesidades del organismo.

La glucólisis o glicólisis (del griego *glykos*, dulce; *lysis*, escisión) es la ruta metabólica que convierte a la glucosa en piruvato, con la producción de dos moléculas de ATP. Consiste en una secuencia de 10 reacciones catalizadas enzimáticamente, que se realizan dentro del citosol de la célula.

La glicolisis comprende dos etapas:

- Una primera etapa preparatoria en la que la glucosa es fosforilada y fragmentada, dando lugar a dos moléculas de gliceraldehído-3-fosfato. En este proceso se consumen dos moléculas de ATP en activar a la molécula de glucosa para su posterior catabolismo.
- Una segunda etapa de beneficios en la que las dos moléculas de gliceraldehído-3-fosfato son oxidadas por el NAD<sup>+</sup> y a continuación convertidas en piruvato, con la producción de cuatro moléculas de ATP.



La reacción global de la glicólisis es:



Así pues, por cada molécula de glucosa que se transforma en dos de piruvato, se producen dos moléculas de ATP y dos moléculas de NAD<sup>+</sup> son reducidas a NADH.

Para que la glicólisis pueda continuar, es esencial que al NAD<sup>+</sup> que se consume en la oxidación del gliceraldehído-3-fosfato se regenere, a partir del NADH producido. Por otra parte, el piruvato obtenido se encuentra en una encrucijada metabólica y su destino depende del tipo de célula y de la disponibilidad de oxígeno.

La glicólisis es una ruta fundamental que puede ser utilizada por casi todas las células, para extraer energía de la molécula de glucosa. Además, la glicólisis prepara a la glucosa para su oxidación completa en la mitocondria, donde se libera mucha más energía.

El piruvato obtenido, que penetra en la mitocondria, se descarboxila oxidativamente para formar acetil-CoA y CO<sub>2</sub>, en una reacción catalizada por el

complejo multienzimático piruvato deshidrogenasa. Esta reacción es reversible y dirige al piruvato hacia su oxidación final en el ciclo de Krebs.

Debido a la alta estabilidad del grupo acetilo no es posible su oxidación directa en la célula y por ello se oxida mediante una ruta cíclica, el ciclo de Krebs.

Como nota histórica, añadir que, en 1935, el bioquímico estadounidense Albert Szent-Gyorgyi (1893 - 1936), una autoridad en los procesos de combustión biológica y oxidación celular, realizó un estudio de gran importancia. Utilizando músculo de paloma observó cómo se desarrollaba la oxidación de varias sustancias en este medio. El investigador demostró que, al agregar a la suspensión ácidos como el succínico, fumárico o málico, aumentaba significativamente el consumo de O<sub>2</sub>.

También Carl Martius y Franz Knoop (1875 - 1946), en 1937, establecieron que el ácido cítrico, por medio de isomerizaciones y descarboxilaciones, se transformaba en ácido α - cetoglutarico.

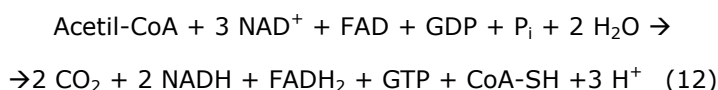
Este y otros descubrimientos llegaron en un momento propicio ya que permitieron que, en 1937, el bioquímico alemán Hans Adolf Krebs (1900 - 1981), continuará la tarea de dilucidar la secuencia de esta nueva vía oxidativa.

Estos descubrimientos le permitieron postular el ciclo de reacciones que explica de forma minuciosa la oxidación del ácido pirúvico hasta CO<sub>2</sub> y agua. Debido a ello, en 1953 se le otorgó el Premio Nobel de Medicina y Fisiología, compartido con Fritz Lipmann (1899 - 1986) quien reconoció por primera vez el ATP.

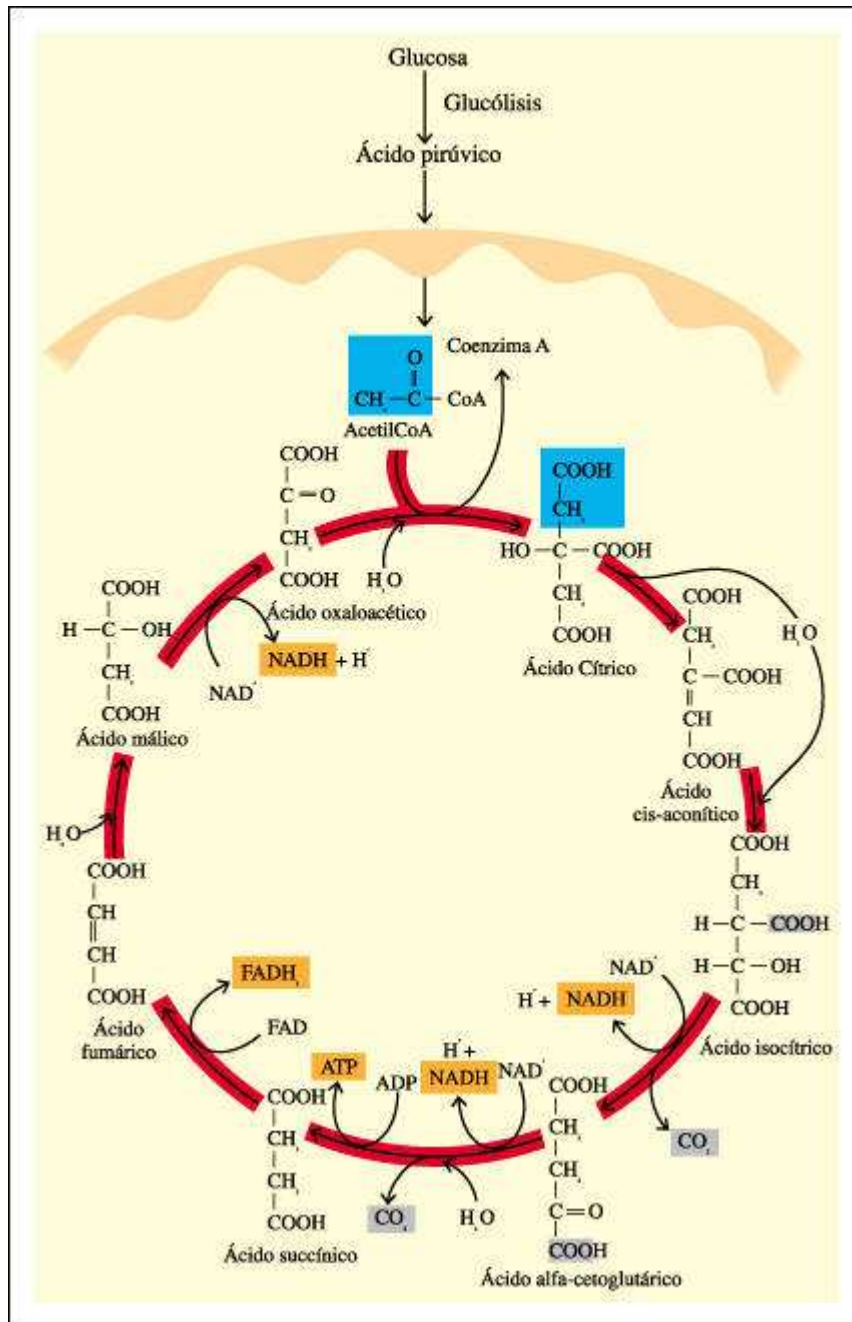
Este ciclo de reacciones químicas es el que ahora conocemos como ciclo del ácido cítrico o ciclo de Krebs.

El ciclo de Krebs es la ruta oxidativa final de la glucosa y de la mayoría de los combustibles metabólicos. Su función es oxidar el grupo acetilo del acetyl-CoA, al mismo tiempo que se reducen los transportadores de electrones NAD<sup>+</sup> y FAD a NADH y FADH<sub>2</sub>.

Este ciclo consta de una serie de ocho reacciones catalizadas enzimáticamente que se realizan en la matriz mitocondrial. La reacción global es la siguiente:







**Figura 10.** Representación esquemática del Ciclo de Krebs

El último paso es la fosforilación oxidativa o la también llamada cadena respiratoria, que es el principal medio de regeneración de los ATP en los organismos heterótrofos. En ella el ATP se regenera a partir de ADP y  $\text{P}_i$  y este proceso está acoplado al transporte de electrones desde el NADH hasta el  $\text{O}_2$ .

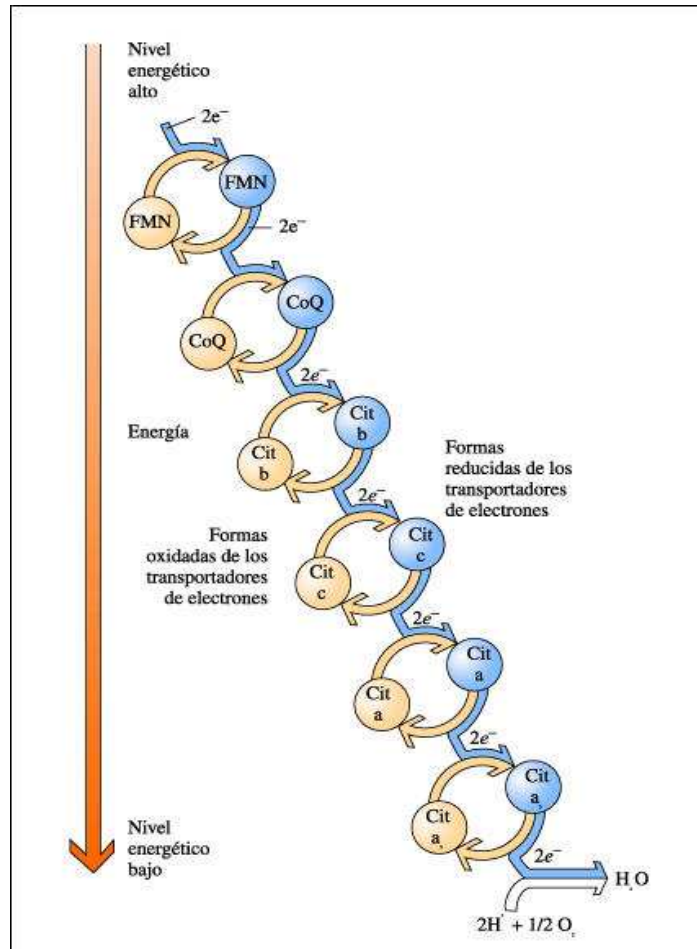


La oxidación del NADH por oxígeno no tiene lugar mediante una reacción sencilla como la que se ha descrito a modo de balance. Los electrones se transfieren desde el NADH hasta el  $\text{O}_2$ , pero no directamente sino a través de una cadena de transporte de electrones, también llamada cadena respiratoria, ya que el último oxidante es el  $\text{O}_2$ . El NADH cede sus electrones a una primera molécula aceptora, con lo que el NADH se reoxida y queda reducida esa molécula aceptora. Esta, a su vez, cede los electrones a un segundo aceptor, que se reduce reoxidando al

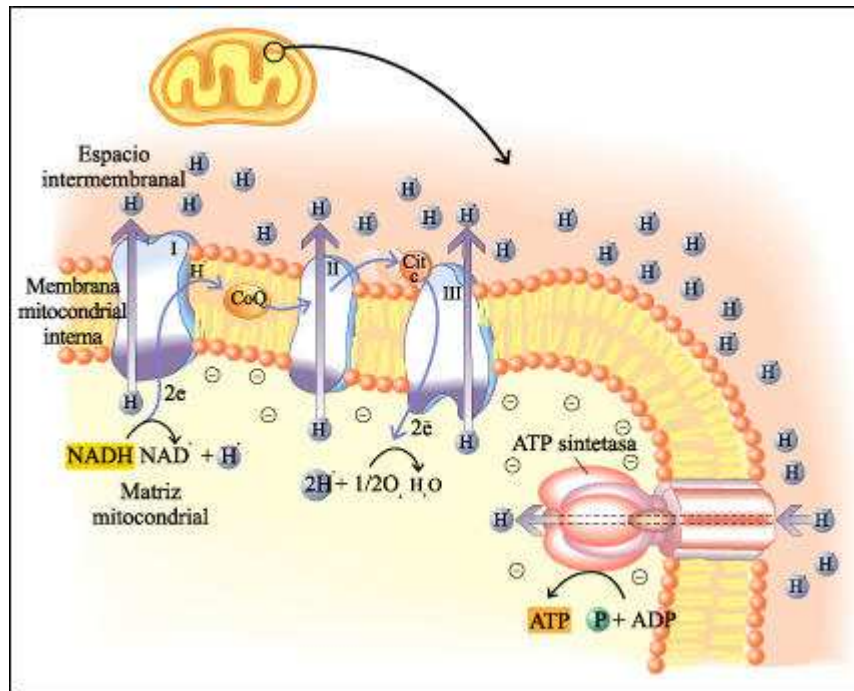
primer aceptor. El proceso sigue por varios pasos sucesivos hasta que un último transportador reducido, cede los electrones al oxígeno.

En los eucariotas, la cadena tiene lugar en la membrana interna de las mitocondrias. En ella, agrupados en 4 complejos, se sitúan los diferentes transportadores, cuyos componentes son proteínas.

Podemos ver que el flujo de electrones es energéticamente favorable a través de los componentes de la cadena, es decir, cada componente tiene mayor potencial redox que el que le precede, y menor que el que le sigue. La energía se va liberando gradualmente, pero hay tres saltos mayores, a nivel de los complejos I, II y IV.



**Figura 11.** Flujo de electrones de la cadena respiratoria



**Figura 12.** Representación de la respiración celular

Según la teoría quimiosmótica la energía liberada en dichos saltos se emplea en bombear protones desde la matriz mitocondrial hacia el espacio intermembranoso. La vuelta de los protones hacia la matriz, a favor de gradiente, se realiza a través del complejo ATP-sintetasa y libera energía que se utiliza para producir ATP.

Por cada par de electrones que son transferidos desde el NADH hasta el O<sub>2</sub> se sintetizan 2 moléculas de ATP, mientras que si los electrones son cedidos a la cadena respiratoria por el FADH<sub>2</sub> sólo se sintetizan 2 ATP.

Así pues, esta teoría relaciona los tres procesos más arriba descritos:

Transporte de electrones desde el NADH hasta el O<sub>2</sub> → Bombeo de protones → Formación de ATP

Con todo lo explicado, ya podemos hacer balance del rendimiento energético de la oxidación total de la glucosa.

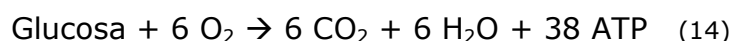
Resumiendo, la oxidación en la cadena respiratoria del NAHD da lugar a la formación de tres moléculas de ATP y la del FADH<sub>2</sub> a 2 ATP.

Mediante la glicolisis, la glucosa se degrada dando lugar a 2 ATP, 2 NADH y dos moléculas de piruvato. En la mitocondria, las moléculas de piruvato se convierten en acetil-CoA, produciendo 2 NADH.

En el ciclo de Krebs, las dos moléculas de acetil-CoA se oxidan produciendo 2 ATP, 2 FADH<sub>2</sub> y 6 NADH.

En la cadena respiratoria, la oxidación de los transportadores de electrones, 2 FADH<sub>2</sub> y 10 NADH, produce 34 ATP mediante la fosforilación oxidativa.

Por tanto, la oxidación completa de la glucosa a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O mediante la glicolisis, el ciclo de Krebs y la cadena respiratoria produce 38 ATP. La reacción global es:



Pero en la depuración biológica de las aguas residuales tenemos que suministrar el oxígeno continuamente para no alcanzar condiciones anaerobias, bien por

difusión o mediante la función clorofílica realizada por las plantas verdes, cuya cantidad de oxígeno está cuantificada en que, por cada gramos de carbono fijado en el proceso de fotosíntesis, se liberan 2,7 gramos de oxígeno.

### 1.8.3. Degradación anaeróbica

La fermentación es un proceso anaeróbico que consiste en la oxidación parcial de los combustibles orgánicos, obteniéndose ATP mediante la fosforilación a nivel sustrato.

La fosforilación a nivel sustrato es la síntesis de ATP a partir de ADP y un grupo fosfato de alta energía que es transferido desde un compuesto orgánico que interviene en la reacción. Este proceso es el mecanismo más sencillo y más antiguo de producción de ATP.

En condiciones anaeróbicas, el oxígeno no actúa como aceptor final de electrones del NADH; por ello, en la fermentación el aceptor final de los electrones es un compuesto orgánico generado por la propia ruta metabólica.

A continuación se describen los tipos de fermentaciones más característicos, por medio de ecuaciones simplificadas con los productos mayoritarios. Cabe decir que las fermentaciones reales raramente pueden ser descritas con una simple ecuación, ya que usualmente se forman pequeñas cantidades de productos minoritarios, no siendo, por tanto, reales las ecuaciones molares.

La **fermentación alcohólica** es un proceso realizado por levaduras y algunas clases de bacterias anaerobias facultativas (*Saccharomyces*), cuya temperatura de fermentación es muy variable, normalmente menor de 40 °C (entre 25 y 30 °C).

Los sustratos provienen fundamentalmente de aguas residuales industriales provenientes, principalmente, de la industria alimentaria y la papelera.

El piruvato obtenido en la glicólisis se descarboxila para formar acetaldehído y CO<sub>2</sub>. El acetaldehído se reduce a etanol por acción del NADH, regenerándose en NAD<sup>+</sup>.

El acetaldehído es el aceptor final de los electrones del NADH obtenido en la glicolisis.

La ecuación fundamental es:



El rendimiento es, por 1 gramo de glucosa, se obtienen 0.51 g de etanol y 0.49 g de dióxido de carbono.

La **fermentación láctica** es la transformación más importante que sufre la lactosa y otros azúcares en ácido láctico. Se lleva a cabo por bacterias mesófilas y/o termófilas (su temperatura de acción es la temperatura ambiente y aproximadamente 40 °C, respectivamente), tales como *Lactococcus*, *Streptococcus*, *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus*, *Micrococcus*, etc.

La ecuación fundamental es:



La **fermentación acética** está constituida por dos fases. En la primera tiene lugar la fermentación alcohólica, y en la segunda, el alcohol se combina con oxígeno formando ácido acético, tal como se describe a continuación:

La ecuación simplificada es:



Pero la degradación de materia orgánica en ausencia de oxígeno libre, mediante la acción de los microorganismos, produce metano y anhídrido carbónico. El proceso cinético es similar al de los procesos aerobios, pero existen diferencias fundamentales.

La digestión anaerobia transcurre en tres etapas.

La primera es la hidrólisis o licuefacción, y consiste en la ruptura de las moléculas de los polímeros orgánicos, que forman parte de la biomasa<sup>5</sup>, a moléculas más simples. En estos compuestos, la mayor parte de la materia orgánica se encuentra en estado sólido (en suspensión o disueltos), y con el objetivo de poder ser asimilada por las bacterias presentes, ha de ser solubilizada mediante la acción de enzimas extracelulares segregadas por las mismas células. En este proceso los carbohidratos se hidrolizan a azúcares, las proteínas a péptidos y los aminoácidos y grasas a glicerol y ácidos varios siendo ácidos orgánicos, el producto final de la licuefacción.

Las bacterias que producen la hidrólisis pueden ser anaerobias estrictas o facultativas. Estas bacterias, que suelen ser muy numerosas, se desarrollan espontáneamente en el medio cuando las condiciones son favorables, o bien pertenecen a la flora de las sustancias orgánicas a digerir. Todas realizan un gran número de actividades enzimáticas, que hacen posible la transformación de las complejas sustancias orgánicas en compuestos más simples.

La importancia de la presencia de estas bacterias, no sólo radica en el hecho de que producen el alimento para otros grupos de bacterias, sino que además eliminan cualquier traza de oxígeno disuelto que pueda quedar en la materia orgánica.

La segunda etapa es la llamada acidogénica o fermentación ácida. Es muy difícil distinguir las dos primeras etapas, ya que algunas moléculas orgánicas son absorbidas directamente por los microorganismos sin ser hidrolizadas, es decir, se forman directamente ácidos volátiles simples.

En esta etapa se obtienen varios compuestos simples, que son los productos finales de su metabolismo anaerobio. La materia orgánica solubilizada es convertida en ácidos orgánicos (acético, propiónico, butírico, con trazas de fórmico, valérico, etc.) así como en hidrógeno y anhídrido carbónico.

A esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaerobias han extraído todo el alimento posible de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, han de eliminar los productos de desechos de sus células. Estos productos, ácidos

---

<sup>5</sup> Según el Diccionario Técnico del Agua, la biomasa se define como "la cantidad total de organismos vivos existentes, en un momento dado, en un ecosistema acuático". En esta definición se suelen incluir, implícitamente, todos los compuestos orgánicos que acompañan a la misma y los productos formados por los organismos.

volátiles sencillos, son los que van a utilizar como alimento las bacterias metanogénicas en la tercera etapa.

La fermentación ácida se caracteriza por una disminución del pH, desde valores cercanos a pH neutro hasta valores próximos a 5.0. Debido a esta disminución del pH, esta segunda etapa es llevada a cabo por los organismos a los que favorece un medio ácido, siendo este el periodo de digestión ácida.

Las bacterias productoras de ácidos son bacterias que fermentan anaeróbicamente los hidratos de carbono, produciendo anhídrido carbónico e hidrógeno y una mezcla de los ácidos citados anteriormente, en función de la concentración de hidrógeno del medio. Son bacterias de crecimiento rápido, cuyo tiempo mínimo de doblaje es de 30 minutos. Las bacterias que convierten los ácidos propiónico y butírico en ácido acético son las llamadas acetogénicas.

Es importante señalar que, a través de la fermentación ácida, no existe reducción apreciable de la DQO (Demanda Química de Oxígeno), ya que en el proceso, únicamente se realiza una conversión de un tipo de compuestos orgánicos a otros.

La tercera etapa es denominada Metanogénesis o periodo de digestión intensa, estabilización y gasificación. En ella son utilizados los materiales nitrogenados más resistentes, como las proteínas, los aminoácidos, etc., disminuyendo el contenido en ácidos volátiles. El pH aumenta hasta un valor comprendido entre 6.8 y 7.4 produciéndose grandes volúmenes de gases, con un 65 % o más de metano.

Los ácidos de bajo peso molecular, producidos en las etapas anteriores, son degradados en esta etapa, a metano y dióxido de carbono, por las llamadas bacterias metanogénicas. De aquí el nombre de esta etapa. Parece ser el que aproximadamente del 70 % del metano producido procede del ácido acético, mientras que el restante proviene del ácido fórmico y del dióxido de carbono.

En esta última etapa es donde verdaderamente se estabiliza la materia orgánica, al convertirse los ácidos orgánicos en anhídrido carbónico y metano. Este gas metano es insoluble y su separación de la solución provoca la estabilización del residuo.

Un examen de las líneas de la fermentación de los carbohidratos, demuestra que es muy pequeña la acción de la fermentación como medio para eliminar el carbón orgánico, ya que la principal función de las bacterias fermentativas es la ruptura o hidrólisis de los polímeros sintetizados biológicamente, a unidades monoméricas, y la conversión de éstas en compuestos más simples, que es la forma en que permanece la mayor parte del carbón orgánico metabolizado. De aquí que la fermentación no haga que disminuya la DQO, aunque si es "eliminada" una pequeña cantidad de carbono por su incorporación a las células.

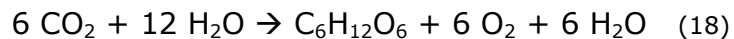
En los sistemas aerobios, los productos finales de la degradación se oxidan más quedando a un nivel menor de energía que los productos finales del sistema de degradación aerobia. Esto explica que se libere muchas más energía en la degradación aerobia que en la anaerobia. Pero aunque el proceso anaeróbico produce menos cantidad de células microbianas, hay problemas en mantener una masa microbiana adecuada en las unidades anaerobias, debido a la lentitud de reproducción de las bacterias metánicas. Por otra lado, los productos finales están en un estado parcialmente oxidado, algunos como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{CH}_4$  no causan problemas, pero otros como mercaptanos, aminas o ácidos volátiles

pueden producir olores desagradables y ejercerán una determinada demanda de oxígeno al ser eliminados.

#### 1.8.4. Fotosíntesis

Mientras una célula heterótrofa cataboliza una molécula de glucosa, procedentes del medio, una molécula autótrofa debe sintetizar previamente la glucosa antes de poderla catabolizar.

El proceso de síntesis de biomoléculas que parte del dióxido de carbono y del agua como sustratos iniciales y requiere, como fuente de energía, la luz del Sol, es la fotosíntesis (del griego *photos*, luz; *syn*, junto; *tithenai*, ubicar). Su reacción global es:



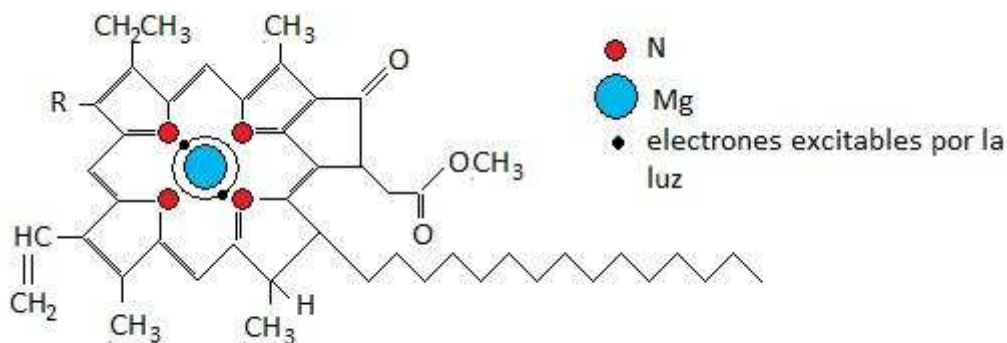
La evidencia de que la fotosíntesis puede ser influenciada por distintos factores llevó a distinguir una etapa dependiente de la luz, la etapa luminosa, y una etapa enzimática, independiente de la luz, la etapa oscura. Los términos reacciones de "luminosa" y "oscura" han creado mucha confusión pues, aunque las reacciones "oscuras" no requieren de la luz como tal, sino solamente de los productos químicos de las reacciones "lumínicas", pueden ocurrir tanto en la luz como en la oscuridad. Recientes estudios han demostrado que varias enzimas que controlan reacciones "oscuras" son reguladas indirectamente por la luz; la actividad de la RuBisCO así como de otras enzimas clave es regulada por la luz, desactivándose en condiciones de oscuridad y reactivándose en condiciones de iluminación. Como resultado, estos términos está cayendo en desuso y están siendo reemplazados por vocablos que describen más precisamente los procesos que ocurren durante cada etapa de la fotosíntesis: etapa de captación de la energía y etapa de fijación del carbono.

Todas las células capaces de realizar la fotosíntesis, a excepción de las bacterias cianobacterias, tienen cloroplastos (del griego *Chloros*, verde; *plastos*, formado), orgánulo en el que tiene lugar la fotosíntesis en los organismos eucariotas (algas y plantas).

En estos orgánulos están presentes las moléculas de las clorofilas. Cada molécula de estos pigmentos<sup>6</sup> de color verde contiene un anillo porfirínico con un átomo de magnesio.

---

<sup>6</sup> Cualquier sustancia que absorbe luz.



**Figura 13.** Representación molecular del anillo porfirínico de la clorofila

En general, cuando una molécula absorbe luz, sus electrones son impulsados a un nivel energético menor. Esta energía es disipada en forma de luz o calor y los electrones vuelven a su estado inicial. Sin embargo, en moléculas como la clorofila, cuando se absorbe la energía de la luz, los electrones (los que mantienen el enlace del átomo de magnesio con el anillo porfirínico), son excitados y pueden cederse fácilmente a un aceptor.

Los pigmentos que intervienen en la fotosíntesis de los eucariotas incluyen las clorofilas y los carotenoides. Hay varios tipos diferentes de clorofila que varían ligeramente en su estructura molecular. En las plantas, la clorofila a es el pigmento involucrado directamente en la transformación de la energía lumínica en energía química. La mayoría de las células fotosintéticas también contienen un segundo tipo de clorofila. Con respecto a los carotenoides, uno de los que se encuentran en las plantas es el beta-caroteno. Los carotenoides son pigmentos rojos, anaranjados o amarillos.

Primera fase de captación de energía o etapa luminosa. La energía lumínica incide sobre pigmentos antena del Fotosistema II, que contiene algunos cientos de moléculas de clorofila, A y B. Los electrones son lanzados cuesta arriba desde la clorofila A a un aceptor de electrones primario. Cuando se eliminan los electrones, ellos son reemplazados por electrones de las moléculas de agua, con la producción simultánea de O<sub>2</sub> libre y protones.

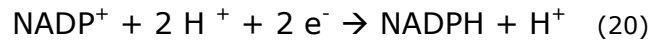
Luego, los electrones pasan cuesta al Fotosistema I a lo largo de una cadena de transporte de electrones; este pasaje genera un gradiente de protones que impulsa la síntesis de ATP a partir de ADP, proceso denominado fotofosforilación o fosforilación fotosintética.



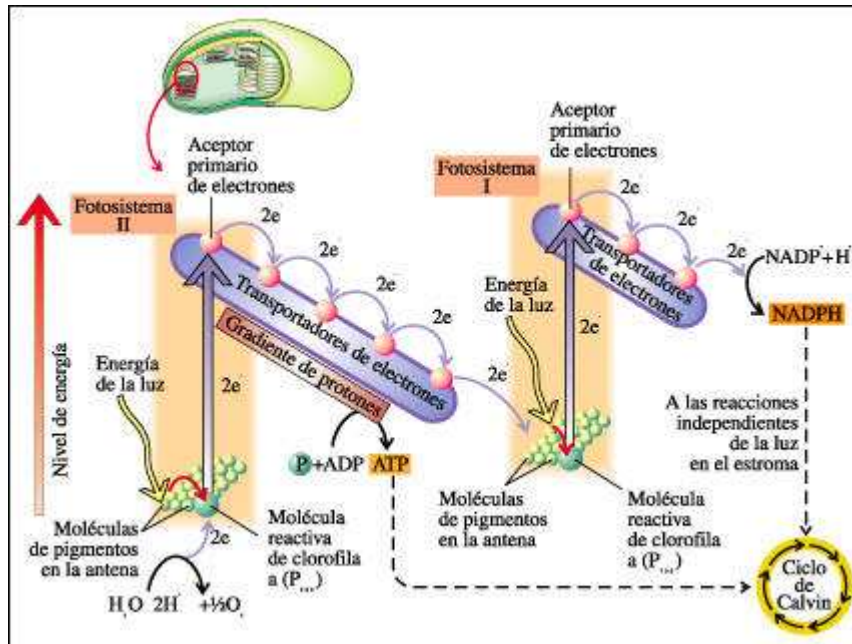
La energía lumínica absorbida en los pigmentos antena del Fotosistema I y transferida a la clorofila da como resultado que se lancen electrones hacia otro aceptor primario de electrones. Los electrones eliminados son reemplazados por electrones del Fotosistema II y son finalmente aceptados por el transportador de electrones NADP<sup>+</sup>. La energía proveniente de esta secuencia de reacciones está contenida en las moléculas de NADPH y en el ATP formado por fotofosforilación<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> Proceso por el cual la energía liberada a través del paso a lo largo de la cadena de transporte de electrones entre los Fotosistemas I y II durante la fotosíntesis genera un gradiente de protones empleado para fosforilar ADP a ATP.





El ATP y el NADPH formados de esta manera, pueden utilizarse en las reacciones químicas necesarias para reducir el dióxido de carbono y obtener biomoléculas orgánicas, pero pueden utilizarse también para otras actividades vitales del organismo.



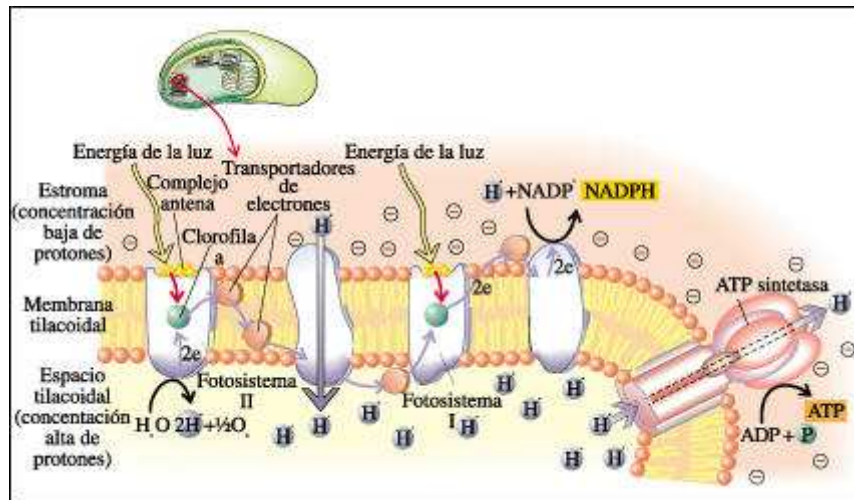
**Figura 14.** Representación del transporte de electrones que tiene lugar en la fotosíntesis

Por tanto, los electrones pasan desde el aceptor de electrones primario, a lo largo de una cadena de transporte de electrones, a un nivel de energía inferior, el centro de reacción del Fotosistema I. A medida que pasan a lo largo de esta cadena de transporte de electrones, parte de su energía se empaqueta en forma de ATP. La energía lumínica absorbida por el Fotosistema I lanza los electrones a otro aceptor primario de electrones. Desde este aceptor son transferidos mediante otros transportadores de electrones al  $\text{NADP}^+$  para formar NADPH. Los electrones eliminados del Fotosistema I son reemplazados por los del Fotosistema II. El ATP y el NADPH representan la ganancia neta de las reacciones que capturan energía. Para generar una molécula de NADPH, deben ser lanzados dos electrones desde el Fotosistema II y dos del Fotosistema I. Se escinden dos moléculas de agua para formar protones y oxígeno, poniendo en disponibilidad los dos electrones de reemplazo necesarios para el Fotosistema II. Se regenera una molécula de agua en la formación de ATP.

La fotofosforilación también ocurre como resultado del flujo cíclico de electrones, proceso en el que no participa el Fotosistema II. En el flujo cíclico de electrones, los electrones lanzados desde el Fotosistema I no pasan al  $\text{NADP}^+$ , sino que son desviados a la cadena de transporte de electrones que une al Fotosistema II con el Fotosistema I. A medida que fluyen a lo largo de esta cadena, nuevamente al Fotosistema I, el ADP se fosforila a ATP.

En un proceso quimiosmótico, como la fotofosforilación que ocurre en los cloroplastos, a medida que los electrones fluyen en la cadena de transporte de

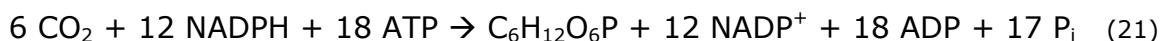
electrones desde el Fotosistema II al Fotosistema I, los protones son bombeados desde el estroma al espacio tilacoide, creando un gradiente electroquímico. A medida que los protones fluyen a favor de este gradiente desde el espacio tilacoide nuevamente al estroma, pasando a través de los complejos ATP sintetasa, se forma ATP. Al igual que la fosforilación oxidativa en las mitocondrias, la fotofosforilación en los cloroplastos es un proceso de acoplamiento quimiosmótico.



**Figura 15.** Representación la respiración celular en el proceso de fotosíntesis

Segunda fase de fijación del carbono o fase oscura. Su eslabón principal es la reducción del dióxido de carbono atmosférico y su incorporación a las cadenas carbonadas de las biomoléculas. Las reacciones metabólicas de esta segunda etapa se denominan ciclo de Calvin o ciclo de Calvin - Benson, en honor a sus descubridores, Melvin Calvin (1911 - 1997) químico y Premio Nobel en 1961, célebre por sus estudios sobre la fotosíntesis y Andy Benson, de la Universidad de California Berkeley mediante el empleo de isótopos radiactivos de carbono.

El balance general del ciclo de Calvin es:



La energía lumínica ha sido almacenada, a raíz de la primera fase, en moléculas sencillas e inestables, que aportarán la energía y el poder reductor para poder llevar a cabo esta segunda fase<sup>8</sup>. En el ciclo de Calvin se integran y convierten moléculas inorgánicas de dióxido de carbono en moléculas orgánicas sencillas a partir de las cuales se formará el resto de los compuestos bioquímicos que constituyen los seres vivos.

El ciclo de Calvin tiene lugar en el estroma del cloroplasto y consta de tres fases.

Primera fase. Fijación del CO<sub>2</sub>. La enzima RuBisCO (Ribulosa Bifosfato Carboxilasa Oxigenasa), que es la más abundante en la naturaleza cataliza la reacción entre la ribulosa bifosfato con el dióxido de carbono, para crear una

<sup>8</sup> En general, los compuestos bioquímicos más reducidos almacenan más energía que los oxidados y son, por tanto, capaces de generar más trabajo.

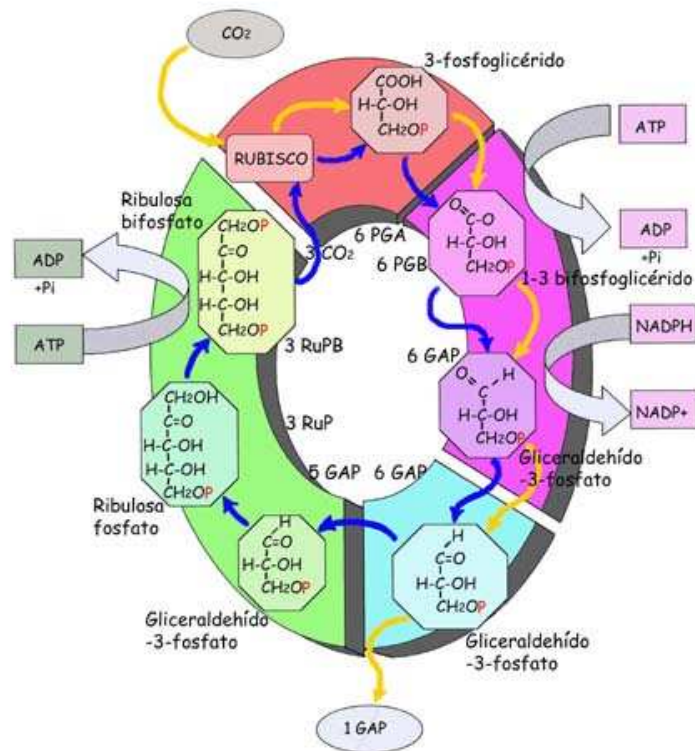
molécula de 6 carbonos, la cual, al ser inestable, termina por separarse en dos moléculas de 3 carbonos cada una, el fosfoglicerato (3 – fosfoglicérido o PGA).

Segunda fase. Reducción. En primer lugar, una molécula de ATP, que procede de la fase anterior, es usada para la fosforilación del PGA, transformándolo en 1-3 bifosfoglicerato. Esta transferencia de un enlace fosfato permita que una molécula de NADPH reduzca el PGA, por acción de la enzima gliceraldehído – 3- fosfato – deshidrogenasa, para formar gliceraldehído – 3 – fosfato (GAP, que es una triosa fosfato, un azúcar tipo aldosa con 3 carbonos que es una molécula estable y con mayor energía libre que las anteriores).

Parte del GAP se transformará en su isómero dihidroxiacetona – fosfato (cetona de tres carbonos). Estas dos triosas- fosfato serán la base a partir de la cual se formen el resto de azúcares, que permitirán a su vez, directa o indirectamente, la formación de cadenas de carbono que componen el resto de biomoléculas que constituyen los seres vivos.

Tercera fase. Regeneración. El ciclo continua a lo largo de una serie de reacciones hasta formar ribulosa – fosfato, que mediante el consumo de otra molécula de ATP, regenera la ribulosa bifosfato original, dejándola disponible para que el ciclo se repita nuevamente. Por tanto, por cada vuelta del ciclo se incorpora una molécula de carbono fijado, dióxido de carbono, a otra molécula preexistente de cinco carbonos, ribulosa bifosfato, siendo el resultado final la regeneración de la ribulosa bifosfato y la incorporación de un nuevo carbono fijado en forma original.

Tras tres vueltas del ciclo, una nueva molécula de GAP sale del ciclo y puede ser posteriormente utilizada para la formación de otras moléculas.



**Figura 16.** Representación esquemática del Ciclo de Calvin

# **CAPÍTULO 3: DEPURACIÓN BIOLÓGICA POR LODOS ACTIVADOS**

El lodo activado en un sistema ecológico formado por diferentes tipos de microorganismos unidos a materiales inertes, orgánicos e inorgánicos.

El mecanismo de depuración es muy sencillo y consiste, básicamente, en realizar en un reactor o tanque de aireación una mezcla íntima entre el agua residual a depurar, el lodo bacteriológicamente activo y el oxígeno necesario para el mantenimiento de la fauna aerobia. Esta mezcla se logra por insuflación de aire o por agitación mecánica.

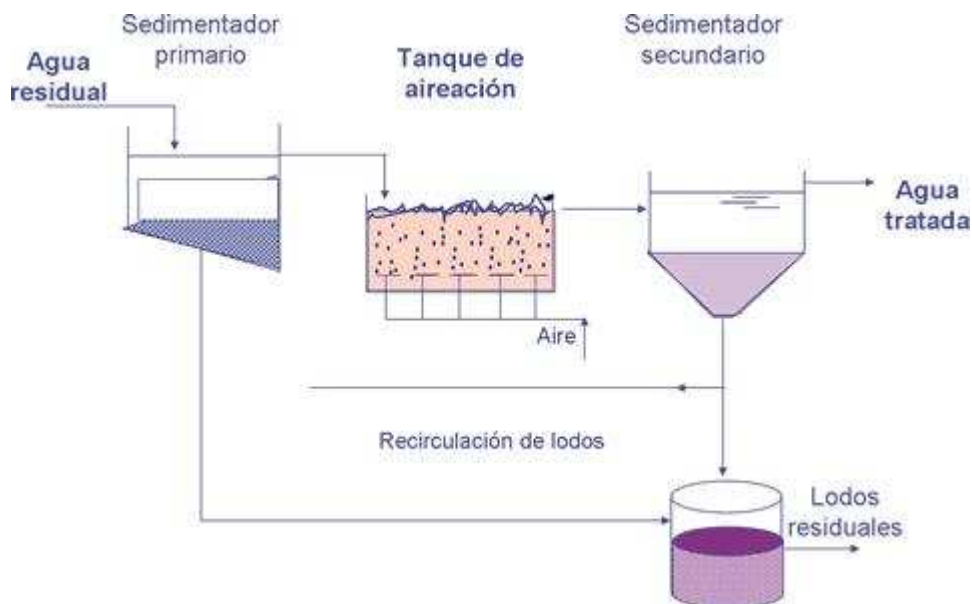
En primer lugar, el proceso de lodos activados comienza después de un pretratamiento, con una decantación primaria, donde se eliminan los materiales más gruesos.

Posteriormente, se introducen las aguas residuales a depurar, con materia orgánica biodegradable, en un reactor donde se mantiene, en suspensión, un cultivo bacteriano aerobio, el cual lleva a la biodegradación de la materia orgánica. El oxígeno que se necesita para crear el medio aerobio se aporta por medio de difusores o aireadores, que a su vez, sirven para mantener el líquido mezclado en un régimen de mezcla completa.

Después de un periodo determinado de tiempo, la mezcla del agua residual con los microorganismos nuevos y viejos y los sólidos en suspensión (líquido mezclado), se lleva a un sedimentador secundario, donde se separan los flóculos del agua residual depurada, la mayor parte por gravedad. Una parte de los lodos

activados sedimentados, se devuelven al reactor biológico para mantener una concentración adecuada de microorganismos en el reactor, mientras que otra parte es separada del sistema.

Se consigue finalmente un efluente clarificado y la estabilización de la materia orgánica disuelta presente en el agua residual.



**Figura 17.** Representación esquemática de la depuración biológica por lodos activados.

El fundamento de esta depuración biológica se basa en la tendencia a coagular que tienen los coloides presentes en las aguas residuales, cuando son sometidas estas aguas, durante algún tiempo, a la inyección de aire finamente dividido.

En efecto, si se airean las aguas residuales a depurar durante un tiempo determinado, se observará la formación de un precipitado coposo, que se deposita en el fondo del reactor. Este hecho se debe a la acción de determinados microorganismos presentes en la masa del agua residual, cuyo crecimiento, a expensas de los nutrientes (carbono, nitrógeno y fósforo principalmente) que se encuentran disueltos en la misma, provoca un aumento de la densidad de las partículas existentes, acelerando su sedimentación. Esta sedimentación de las partículas en suspensión, arrastra las bacterias, formándose el lodo activado, colonizado por numerosos microorganismos.

El buen funcionamiento de una estación depuradora de lodos activados exige que en el reactor biológico se logre, lo más correctamente posible:

- Un aumento en la compactación de los sólidos en suspensión.
- Un crecimiento adecuado de los flóculos.
- Una estabilización rápida de la materia orgánica disuelta.

## 1.9. Etapas

En la depuración biológica por lodos activados tienen lugar dos etapas:

- Una parte de la materia orgánica disuelta se oxida para obtener energía imprescindible para formar nuevas células.
- Las bacterias se apelotonan en flóculos, susceptibles de ser eliminados por sedimentación.

De aquí que se puedan distinguir en el proceso dos acciones:

- Una acción asimiladora real por parte de los microorganismos, común en todos los procesos biológicos.
- La acción clarificadora del flóculo, adsorbiendo las sustancias presentes en suspensión coloidal.

Debido al corto tiempo de permanencia en el reactor de las aguas residuales a depurar, no se realiza la hidrólisis de las partículas orgánicas insolubles. Su acción depuradora se limita, además de a biodegradar una parte de las materias orgánicas disueltas, a eliminar los sólidos en suspensión, transfiriendo la contaminación y su problema a los volúmenes de lodos activados producidos y al consiguiente destino de los mismos.

Estas estaciones depuradoras son efectivas únicamente para biodegradar partículas, además fácilmente biodegradables, de un tamaño aproximado de 20  $\mu$ , debido a que el tiempo que tardan las partículas de mayor tamaño en biodegradarse es mucho mayor que el periodo de permanencia en el reactor del agua residual a depurar.

En el proceso de lodos activados se suceden las siguientes fases:

- En primer lugar se mezclan los lodos activados con las aguas que se van depurar. Es muy importante que los lodos activados recirculados se mezclen bien con las aguas residuales. Esto se hace generalmente agregando los lodos activados a las aguas residuales sedimentadas, en la entrada de las aguas residuales en el reactor biológico, donde la agitación provocada por el aire insuflado, efectúa una mezcla rápida.
- Una vez el agua a tratar se encuentra dentro del reactor, debemos airear la mezcla y agitarla para un mejor resultado. La aireación facilita el mezclado de los lodos recirculados desde el sedimentador secundario con las aguas residuales, el suministro de oxígeno necesario para llevar a cabo la oxidación biológica y mantenimiento de los lodos en suspensión por agitación de la mezcla.

Pero hay que señalar que la agitación, al facilitar la dispersión, puede hacer más pequeño el tamaño del flóculo formado, y a menos que se vuelvan a juntar de nuevo, aumentando su tamaño, durante el tiempo que tarda en recorrer el camino entre el reactor hasta el sedimentador secundario, puede disminuir la eficiencia de la sedimentación.

Además, si la agitación no es suficiente, el tamaño del flóculo se hará demasiado grande, acelerando la sedimentabilidad disminuyendo la compactabilidad de la biomasa sedimentada. Por otra parte, si el flóculo es demasiado grande, puede dificultarse el paso de los nutrientes y el oxígeno al interior del mismo, disminuyendo la eficacia de la depuración por unidad de biomasa, y creando un ambiente esencialmente anaeróbico. Esto puede ser la causa de una disminución de la eficiencia de la depuración, así como de la muerte de células y puesta en

libertad o formación de compuestos orgánicos, no presentes en las aguas residuales en su origen.

Por tanto, la activación de los lodos consiste en fomentar la vida en el agua residual, siendo una repetición, a gran escala, del proceso de autodepuración que tiene lugar en la Naturaleza, con la salvedad de que, en el reactor biológico, los organismos que biodegradan la materia orgánica se apilontonan en un espacio reducido, el lodo activado, proporcionando superficies vivientes de 20 a 100 m<sup>2</sup> por m<sup>3</sup> de volumen, donde se forman zonas de acumulación que tienen como consecuencia la floculación de los sólidos en suspensión.

Por último, en el sedimentador secundario, parte de los flóculos cargados de biomasa, sedimentados, son recirculados al reactor biológico (tanque de aireación) y los restantes son eliminados y llevados a las zonas de transformación y adecuación. De ésta forma, se mantiene en el sistema una masa constante de microorganismos, de los que dependerá la realización de los procesos de biodegradación. La realización del proceso depende de la cantidad de biomasa reciclada, que debe ser la necesaria para lograr que exista, en el reactor biológico, la concentración adecuada de microorganismos.

Las bacterias que no están integradas en los flóculos (bacterias dispersas), son eliminadas por los protozoos y rotíferos o en el efluente de la planta.

## 1.10. Eliminación de la materia orgánica

Como es obvio, el papel de los microorganismos es vital para el funcionamiento de este sistema, ya que son los encargados de degradar la materia orgánica contaminante presente en el agua residual a depurar.

Gran parte de la materia orgánica presente en el agua residual es utilizada por las bacterias aerobias o facultativas presentes en los lodos para realizar sus funciones; obtención de energía para la síntesis de nuevas células y síntesis de materia celular. Sólo una pequeña parte de la materia orgánica es oxidada a compuestos de bajo contenido energético, como nitratos, sulfatos, anhídrido carbónico, etc.

La eliminación se realiza en dos fases. Una vez ha pasado el agua a depurar por el decantador primario, se realiza una eliminación grande de la materia orgánica en suspensión y coloidal, y posteriormente se biodegrada la materia orgánica soluble.

Esta eliminación de la materia orgánica presente en un agua residual, en el proceso de lodos activados, se logra por varios mecanismos, que dependerán de las características fisicoquímicas de la materia orgánica existente.

- Eliminación de la materia en suspensión por englobamiento en los flóculo biológico.
- Eliminación de la materia coloidal por adsorción fisicoquímica sobre el flóculo.
- Absorción de las sustancias solubles por los microorganismos.

Para que las sustancias coloidales y en suspensión sean utilizadas por los microorganismos, deben experimentar sus moléculas una ruptura previa por hidrólisis, obteniéndose moléculas de menor tamaño, solubles, las cuales pueden



ser utilizadas en la síntesis celular. El tiempo que se requiere para lograr esta ruptura, en un sistema aclimatado, depende fundamentalmente de las características de la materia orgánica y de la concentración de lodo activado.

Hay que recalcar que uno de los factores esenciales para lograr una máxima eficacia en el proceso biológico de la depuración por lodos activados, es la existencia de una floculación efectiva seguida de una rápida sedimentación y consiguiente compactación del flóculo.

Ahora bien, la floculación, por sí misma, no garantiza una rápida sedimentación, ya que depende de la densidad del lodo activado. Por esta razón, es preciso mantener en este proceso de depuración unas condiciones que faciliten la formación de un lodo de gran densidad.

## 1.11. Lodos activados

El origen de las diversas poblaciones de microorganismos presentes en los lodos activados son las aguas residuales introducidas en el reactor, las cuales vienen determinadas por las características físicas y químicas de éstas, y por el diseño y condiciones de operación de los reactores biológicos. De aquí que sean las condiciones físicoquímicas del medio, el factor primario para el asentamiento de estas poblaciones.

El objetivo desde el punto de vista de los microorganismos es lograr un estado de equilibrio, con un número de individuos de cada especie relativamente estable, en equilibrio dinámico.

La alimentación de los microorganismos está organizada mediante series de cadenas tróficas alimentarias constituidas en su base por bacterias formadoras de flóculos, las cuales captan directamente la energía que necesitan para realizar sus funciones vitales. Después van apareciendo eslabones sucesivos de organismos que son consumidores del nivel anterior, pasando los consumidores de un nivel a ser alimento del siguiente nivel. Esto da a la comunidad una estructura trófica en la que la forma de alimentación está, en cierto modo, relacionada con la morfología de los microorganismos.

La comunidad biológica de lodos activados estabilizados, se establece después de un periodo inicial de producción y crecimiento de lodos, lo cual se logra deteniendo su evolución mediante un proceso de sedimentación de los mismos. Este hecho hace que se retenga la masa biológica y se reemplacen, la aguas depuradas, con muy pocos nutrientes, por aguas residuales brutas, de modo que se mantenga el equilibrio entre la masa biológica y el aporte de nutrientes, facilitando así también la cinética biológica.

Las características esenciales de un lodo biológico es que debe flocular con facilidad y contener una población microbiana capaz de biodegradar los nutrientes que contenga el agua residual a depurar.

Los flóculos de los lodos activados son aglomeraciones de materiales inertes, orgánicos e inorgánicos, de varios millones de células bacterianas junto con otros organismos, y están formados por varios componentes, microorganismos viables, organismos no viables, organismos muertos, materia orgánica inerte y materia orgánica biodegradable.

Se llaman organismos viables a los que utilizan los nutrientes orgánicos para producir nuevos organismos o biomasa.

Organismos no viables a los que utilizan bioquímicamente los nutrientes pero no producen nuevos organismos.

La proporción de organismos viables en los lodos activados depende de la velocidad de crecimiento, la que se determina por su tiempo de permanencia. Esta proporción puede ser del 2 al 3 %, con una edad de los lodos de 4 días.

Sin embargo los flóculos no se deben considerar como unidades estables ya que un lodo de buena floculación, en un sistema agitado, está en equilibrio dinámico entre dos tendencias: la de los flóculos a agregarse en otros mayores, y el efecto de desfloculación, producido por el movimiento turbulento provocado por el aire inyectado, que rompe los flóculos en unidades más pequeñas. El equilibrio de la dispersión depende de la intensidad de la turbulencia.

Por tanto, un lodo activado debe flocular con facilidad y contener una población microbiana capaz de degradar los nutrientes que contiene el agua residual a depurar.

Ahora bien, se pueden aceptar algunas generalizaciones en cuanto a los flóculos:

- Los flóculos grandes están formados básicamente por bacterias muertas rodeadas de bacterias activas viables
- En los flóculos más pequeños existe una mayor proporción de bacterias vivas.
- Que, como es obvio, los flóculos grandes se asientan con mayor rapidez que las partículas pequeñas.
- Los procesos de alta velocidad tienen una actividad microbiana mayor que los procesos de baja velocidad.

En general, los microorganismos desarrollados espontáneamente en un reactor biológico aerobio, son asociaciones naturales formadas por un conjunto de organismos con características definidas, los cuales mantienen relaciones entre sí y con el medio que las rodea. Ahora bien, el balance entre los distintos tipos de organismos varía en la fase de crecimiento, por tanto, las propiedades de los lodos variarán también en ésta fase.

En relación con la autodepuración, en los lodos activados, la compleja red trófica de un río se simplifica, quedando únicamente los primeros eslabones o niveles, bacterias heterótrofas y protozoos saprobios, como organismos que representan el mayor porcentaje de las especies presentes.

#### *1.11.1. Organismos presentes*

El ecosistema está constituido fundamentalmente por organismos unicelulares, siendo los más abundantes las bacterias, que se sitúan principalmente en los flóculos. A veces forman agrupaciones características o colonias de células poco diferenciadas entre sí, como las cadenas de bacterias o las colonias de protozoos.

Las bacterias son gram-negativas, con miembros del género *pseudomonas*, *zooglea*, *achromobacter*, *flavobacterium*, *nocardia*, *bdellovibrio*, *micobacterium* y las bacterias nitrificantes *nitrosomas* y *nitrobacter*. Además, se pueden presentar

diversas formas filamentosas, tales como *sphaerotilus*, *begiatoa*, *thiothrix* y *geotrichum*.

Existen otros grupos zoológicos en menor cantidad, los metazoos (rotíferos y nematodos), de menor importancia trófica. Los protozoos y los rotíferos actúan como depuradores de los efluentes.

La presencia de protozoos en cantidades razonables, se considera como un signo de lodo sano.

En los protozoos se produce una sucesión. En principio, la fauna dominante corresponde a los rizópodos y flagelados, que son reemplazados a continuación por nadadores libres y posteriormente por pericritos fijos a medida que el lodo se hace más eficiente y el grado de depuración avanza.

En relación con los hongos, las aguas residuales urbanas favorecen el predominio de las bacterias en detrimento de los hongos. Sin embargo, estos últimos pueden alcanzar un gran desarrollo en circunstancias excepcionales o en aguas residuales, de acuerdo con los factores siguientes:

- Baja concentración de oxígeno por excesiva carga de materia orgánica o aireación insuficiente.
- pH bajo
- Baja concentración de nitrógeno, ya que los hongos requieren menos cantidad de éste elemento por unidad de masa.

Lo que determina el asentamiento y desarrollo de unas especies u otras, con variaciones en la diversidad, es la composición del agua residual, lo que se refleja en la formación de las comunidades biológicas. La población microbiana tiene tendencia a adaptarse a los nutrientes disponibles. Esta adaptación es un proceso lento, especialmente a los bajos niveles de actividad a los que operan, en general, los procesos de depuración de las aguas residuales.

#### *1.11.2. Factores que influyen en los organismos presentes en los lodos*

Los microorganismos presentes en el lecho dependen de:

- Disponibilidad del alimento
- Competencia con otras especies situadas en el mismo nivel trófico
- El efecto de predación de otras especies superiores

Aparte también intervienen factores físicos (disponibilidad de oxígeno, pH, temperatura) y químicos (sustancias tóxicas, antibióticos, etc.)

En general, la composición de la flora microbiana de los lodos activados está determinada principalmente por la naturaleza del alimento y secundariamente por las condiciones de la planta de tratamiento.

Las características del lodo activado es el primer factor determinante de la composición del agua del líquido mezclado, contribuyendo a la finalidad de estabilizar y biodegradar la materia orgánica

Cuando a un ecosistema no se le permite desarrollarse en el sentido temporal, mediante la eliminación de su biomasa, se sesga su evolución, potenciando especies de fácil reproducción y del alto potencial colonizador, dando como

consecuencia una diversidad relativamente baja. Esta baja diversidad origina una fragilidad en el ecosistema.

Por esto, en una estación depuradora de lodos activados, las alteraciones ocasionales producen, en la cadena trófica o alimentaria, sucesiones distintas de microorganismos.

### 1.11.3. Rendimiento

El rendimiento de la depuración viene determinado por la importancia de la comunidad biológica. En ésta, en primer lugar predominan las bacterias, libres o aglomeradas en flóculos, de acuerdo con la relación carga-biomasa, y al tiempo de contacto adecuado para absorber y metabolizar las materias orgánicas presentes en el agua residual. Como consecuencia de los cambios, se realizará el asentamiento de nuevas poblaciones que obtienen su alimento como predadoras de aquellas.

El grado de mezcla es importante desde el punto de vista del rendimiento, ya que tiende a eliminar diferencias locales de temperatura y composición química, y es frecuentemente estudiada con la aireación porque la misma mejora de transferencia de oxígeno al agua, el cual a su vez puede determinar, no sólo los tipos de organismos presentes, sino también la velocidad del metabolismo, la eficiencia de la utilización del sustrato y el aumento de la producción microbiana.

A modo de resumen, el rendimiento del proceso de lodos activados se ve afectado por:

- La disolución del oxígeno en el agua residual y su difusión en la misma.
- La homogeneización de las aguas residuales a depurar.
- La adsorción del sustrato orgánico por el flóculo biológico.
- La difusión del sustrato soluble en el flóculo.
- El metabolismo de los microorganismos.
- La floculación biológica, como resultado de la formación de polímeros exocelulares durante la fase de respiración endógena.
- La respiración endógena de las células.
- La liberación de dióxido de carbono de la masa de células activas.
- La destrucción o descomposición de las células muertas.

## 1.12. Floculación

Se llama floculación biológica o biofloculación al proceso de formación del flóculo, y es realizada por los polímeros naturales segregados por las bacterias, los cuales contribuyen a establecer puentes entre ellas.

La formación correcta de flóculos es un requisito necesario para la separación de los sólidos en suspensión en el sedimentador secundario. Cuando se aumenta el tiempo medio de retención celular, mejoran las características de sedimentación del flóculo.

Estos sólidos en suspensión se adhieren a los flóculos, aumentando su densidad y facilitando y acelerando la decantación.

El aumento de la sedimentabilidad de los flóculos es el resultado de la facultad que tienen los microorganismos y las sustancias coloidales, de comprimirse en el reactor, mezclándose con los sólidos que se encuentran en el líquido mezclado, para aglomerarse en un flóculo más grande, en una zona de alta velocidad de sedimentación. Este proceso de aglomeración es conocido como floculación y es fundamental si se desea que sea eficiente la depuración de las aguas residuales.

El crecimiento floculante de los lodos activados es importante para lograr la adsorción y aglomeración de las sustancias con carga iónica, coloidales o en suspensión, presentes en las aguas residuales, y para una rápida sedimentación de los lodos en el sedimentador secundario.

Muchos son los estudios realizados, dirigidos a conocer el mecanismo de la floculación biológica, el cual se ha demostrado se produce como consecuencia de la interacción de los polímeros extracelulares de alto peso molecular, los cuales puentean la distancia entre las bacterias. Esto permite formar el enlace punta con punta de las bacterias, uniéndose las células en matrices tridimensionales, mediante enlaces físicos y electrostáticos de los polímeros con la superficie de la célula. Cuantos más polímeros sean sintetizados, más firmemente unidas estarán las células, siendo los flóculos más resistentes.

Cuando aumenta la edad media de las células, la carga superficial de las mismas se reduce y los microorganismos comienzan a producir polímeros extracelulares, quedando, al cabo del tiempo, envueltos en una capa viscosa.

La presencia de estos polímeros y de la capa viscosa promueve la formación de flóculos. Los tiempos medios de retención celular son del orden de tres a cuatro días.

Finalmente, el flóculo del lodo activado está compuesto de una matriz sintética gelatinosa, en la que están embebidas bacterias filamentosas unicelulares y en las que pululan protozoos y algunos metazoos.

Cuando en un reactor biológico se mezclan los lodos activados procedentes del sedimentador secundario (lodos retorno) con las aguas residuales crudas tiene lugar una aglomeración rápida de los sólidos en suspensión con los flóculos de los lodos activados (enmallado), produciendo una disminución de la demanda de oxígeno y ralentizando la biodegradación y asimilación de las materias orgánicas aglomeradas. A este proceso se le suele llamar estabilización debido a esta ralentización de la putrefacción. Los lodos recirculados tienen, entre otras, la misión de reinocular el proceso, de manera que el sistema tiende a seleccionar organismos capaces de formar flóculos.

De hecho, la floculación se inicia utilizando las cargas superficiales de las bacterias formadoras de flóculos, las cuales se neutralizan con las sales del medio.

La tensión superficial puede provocar asociaciones de flóculos, principalmente en la interfase aire-agua, la cual puede estar activada por la presencia de agentes tensioactivos.

### **1.13. Características de los lodos**

Los principales problemas que afectan a los lodos son los de su separación del agua residual, lo que implica su capacidad para sedimentar rápidamente. En la

gran mayoría de casos una buena operación en el sedimentador secundario es el factor limitante en la producción de un efluente de la calidad deseada.

Las características de los lodos recirculados se determinan mediante el índice volumétrico de lodos. A mayor sea este valor, peor sedimentarán los lodos, y por tanto, menor concentración se conseguirá en el decantador secundario.

Se aceptan, como condiciones ideales de las características de los lodos:

$$\text{Carga másica } C_m = 0,50 \text{ kg DBO}_5 \text{ día/kg SSLM}$$

$$\text{Índice volumétrico lodos IVL} = 100 \text{ L/kg SSLM}$$

El reactor biológico y el sedimentador secundario están relacionados íntimamente y, por tanto, la sedimentabilidad de los lodos vendrá determinada por las condiciones existentes en el reactor biológico.

### 1.13.1. Esponjamiento

A veces se forman flóculos ligeros, esponjosos y que presentan unas condiciones pésimas para sedimentar. Este fenómeno se conoce como esponjamiento.

Puede ser debido a:

- Producción de lodos muy hidratados, gelatinosos, con una densidad muy baja
- Crecimientos filamentosos. Estos organismos filamentosos en los flóculos son arrastrados con el efluente tratado, lo que produce un efluente con un alto contenido en materias orgánicas. Se ha encontrado que son varios los organismos filamentosos que están asociados a los lodos esponjosos, *Sphaerotilus natans* y *Streptothrix*, hongos filamentosos como el *Geotrichum*, el alga azul verdosa *Schizothrix* y un gran número de protozoarios ciliados con tallo. El crecimiento excesivo de organismos filamentosos comunica a los lodos malas características de sedimentabilidad porque los filamentos, que se extienden fuera del flóculo, aumentan la resistencia al movimiento y reducen la velocidad de sedimentación del flóculo, inhibiendo la compactación de los mismos después de la sedimentación.

También puede ocurrir que nos encontremos ante un lecho que padece un esponjamiento permanente, cuyas razones pueden ser:

- Bajo pH
- Bajo nivel de oxígeno disuelto
- Bajas concentraciones de nitrógeno y fósforo o carbono
- Valor alto de relación A/M, que está relacionado con una edad de los lodos baja
- Tiempo de aireación muy bajo

### 1.13.2. Desfloculación

Este fenómeno puede presentarse en lodos con una buena sedimentabilidad. Cuando aparece, el agua sobrenadante en el sedimentador secundario es turbia y de aspecto parecido a cuando se produce el lavado de los lodos. A medida que se pierden lodos debido a la desfloculación, se hace más difícil mantener una

concentración de lodos en el reactor biológico. Este fenómeno se atribuye a la presencia de bajos niveles de oxígeno disuelto, bajo pH o existencia de tóxicos.

### *1.13.3. Flóculos "punta de alfiler"*

Estos lodos se pueden formar cuando la edad de los lodos es mayor a 6 días, presentándose parte de los mismos como pequeños flóculos, que no sedimentan fácilmente. Este fenómeno sólo se observa en sistemas con una baja carga orgánica. Su presencia es indeseable, ya que los mismos permanecen en el efluente después de la sedimentación. A veces, el lodo sedimentado en el sedimentador secundario consume rápidamente el oxígeno disuelto.

### *1.13.4. Lodos ascendentes*

Cuando el agua a depurar contiene nitratos o nitritos, pueden ser utilizados éstos como fuente alternativa de oxígeno, produciéndose nitrógeno gaseoso. Las burbujas de gas así formadas, hacen que se eleven los flóculos hasta el sobrenadante siendo eliminados por el efluente. Este fenómeno de lodo ascendente se puede evitar impidiendo que los lodos permanezcan poco tiempo en la etapa de sedimentación y asentamiento, lo que a la vez impedirá que se produzcan malos olores como consecuencia del medio anaerobio que se produce.

### *1.13.5. Producción de espumas*

En la aireación y agitación en el reactor biológico se producen espumas, en la mayoría de las veces, ligeras y transitorias. Sin embargo, en ciertas ocasiones se forma una espuma dura y espesa con un alto contenido en materia orgánica.

Existen varias teorías que pretenden explicar la formación de espumas, siendo las causas más frecuentes un exceso de detergentes o de aireación. Parece que existe una relación entre la aireación, SSLM y la formación de espumas.

## **1.14. Volumen**

El volumen del reactor biológico se calcula de acuerdo con la ecuación:

$$V = (Q/S_vSLM) \cdot (L_i - L_e) / (A/M) \quad \text{en m}^3 \quad (22)$$

Siendo:

$L_i$ : DBO<sub>5</sub> del agua de entrada en el reactor biológico

$L_e$ : DBO<sub>5</sub> del agua de salida del reactor biológico

Q: caudal medio en 24 horas.

## **1.15. Variaciones del afluente y calidad final**

El objetivo del diseño de un reactor biológico es la obtención de un efluente de la calidad deseada, para lo cual debe ser correcto el diseño y la operación de la estación depuradora. Ahora bien, como suele ocurrir, una operación inteligente y correcta en la planta sufre, en parte, errores importantes en el diseño.

La naturaleza y extensión de las variaciones del efluente viene determinada por distintos factores, siendo los más importantes:

- Variaciones de caudal y de la carga orgánica de las aguas residuales que llegan a la estación depuradora
- Variaciones de los parámetros operacionales de la planta: edad de los lodos, tiempo de retención de los lodos o tiempo de retención celular; relación alimento/microorganismos, concentración de sólidos en el líquido mezclado, relación de lodos eliminados y concentración de sólidos.
- Oscilaciones en la demanda de oxígeno de las aguas residuales
- Características de la sedimentación de los lodos, IVL
- Factores ambientales, como la temperatura del agua residual y del ambiente, el viento, etc.

#### *1.15.1. Variación en la calidad del efluente*

Las variaciones de caudal y carga orgánica del agua residual que lleva a la depuradora están en función de la población que la genera. Hay que tener en cuenta que el aumento del caudal reduce el tiempo de retención y aumenta la agitación de las aguas residuales a depurar. Como consecuencia, incrementa la carga contaminante, provocando alteraciones en la sedimentación y pudiendo producir un lavado de los lodos en el sedimentador secundario.

Ambos hechos se traducen en una mayor presencia de sólidos en suspensión en el efluente y una menor biodegradación de los contaminantes disueltos.

Los dos parámetros de la planta que pueden variar para intentar minimizar la variabilidad del caudal que llega a la depuradora, son:

- La cantidad de lodos activados recirculados del sedimentador secundario al reactor biológico.
- La cantidad de lodos activados eliminados.

Para resolver los problemas que se presentan en la operación de las estaciones depuradoras, causados por estas variaciones, y para mejorar la calidad de los efluentes degradados, se utiliza la homogeneización de los caudales.

Esta operación consiste en la laminación de las variaciones de caudal para obtener un afluente lo más aproximadamente constante.

Entre las ventajas que reporta la homogeneización de los caudales, se encuentran la mejora del tratamiento biológico debido a la eliminación o disminución de los efectos causados por la variación brusca de las cargas orgánicas, mejora de la calidad del efluente y del rendimiento de la sedimentación secundaria, etc.

#### *1.15.2. Determinación carga orgánica*

La carga orgánica de la planta, llamada también carga másica, se puede expresar por medio de varios parámetros que quieren señalar la cantidad de nutrientes que entran en el sistema, expresados como demanda de oxígeno en la materia orgánica por unidad de tiempo (DBO<sub>5</sub> y DQO).



Hay que tener en cuenta que los valores de la demanda de oxígeno, como la DQO, pueden inducir a error, ya que en su determinación no se tienen en cuenta la biodegradabilidad de la materia orgánica, sino solamente su poder reductor. Por esta razón una depuradora puede reducir la DBO a niveles aceptables aunque la DQO sea muy alta.

Los parámetros que se consideran son:

- La relación entre la cantidad de materia orgánica que entra en el reactor, por unidad de tiempo, y la masa de microorganismos existentes en el mismo
- La carga contaminantes introducida, en peso o en volumen, por unidad de lodo activado existente en el reactor de oxidación.
- La carga de nutrientes orgánicos por unidad de volumen en el reactor biológico

La carga se suele expresar en unidades de volumen o de biomasa

- Carga orgánica por unidad de volumen. Se expresa generalmente en gramos de DBO<sub>5</sub> por m<sup>3</sup> y día.

Este parámetro fue introducido por Imhoff<sup>9</sup> en 1930 el cual recomendaba que los tanques de aireación fuesen diseñados sobre la base de una carga orgánica de 500 g DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup> · d.

En otras investigaciones, en relación con la correlación entre la eliminación de la DBO<sub>5</sub> y la carga por unidad de volumen, la eficacia de la planta variaba entre el 82 y el 96% de eliminación de la DBO<sub>5</sub> con cargas que iban de 110 a 500 g DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>·d.

- Carga orgánica por unidad de biomasa. Se expresa generalmente en gramos de DBO<sub>5</sub> por gramo de sólidos en suspensión en el reactor biológico. En algunos casos se utilizan la cantidad de sólidos volátiles en suspensión, parámetro que intenta relacionar, la carga medida como DBO<sub>5</sub> en el reactor biológico, con el número de microorganismos disponibles para la estabilización de la materia orgánica, identificada como la relación A/M.

Este parámetro de carga orgánica por unidad de biomasa se considera como más representativo de las condiciones actuales de los reactores biológicos que otros parámetros, ya que se tienen en cuenta, simultáneamente, dos factores tan fundamentales como la cantidad de materia orgánica y la cantidad de biomasa disponible para la estabilización, ya que existe una estrecha correlación entre la eliminación de la DBO<sub>5</sub> y la concentración de sólidos volátiles en suspensión.

En general, la carga orgánica o A/M en g DBO<sub>5</sub> día/ d SSLM viene dada por

$$\text{Carga másica} = C_m = \text{g DBO}_5 \text{ día/g SSLM} \quad (23)$$

Hay que resaltar que hay que tener en cuenta la distinción entre los sólidos en suspensión, biodegradables o volátiles, y los minerales o no biodegradables.

---

<sup>9</sup> Karl Imhoff (1876 – 1965), ingeniero alemán especializado en aguas, que concibió un tipo de tanque de doble función, recepción y procesamiento, para aguas residuales.

Suponiendo que el factor de conversión de sólidos en suspensión en sólidos volátiles es de 80% de volátiles, se puede escribir

$$g \text{ SSLM} = V \text{ m}^3 (\text{Cl kg m}^3/0.8) \quad (24)$$

La carga volúmica será

$$C_v = \text{kg DBO}_5 \text{ día/V} \quad (25)$$

Los kg de DBO<sub>5</sub> que pueden ser tratados en un día dependerá del volumen del reactor, estando la carga volúmica comprendida entre 320 y 640 g/día/m<sup>3</sup>.

El factor de carga orgánica  $F_c$  se determina teniendo en cuenta que si el efluente en la etapa de aireación (Reactor biológico) tienen una DBO<sub>5</sub> de  $S_o$  (kg/m<sup>3</sup>) y un caudal  $Q$ (m<sup>3</sup>/día), la carga de los nutrientes orgánicos será:

$$\text{Carga} = S_o \cdot Q \text{ kg/Día de DBO}_5 \quad (26)$$

El factor de carga de los lodos,  $F_c = A/M_v$ , viene dado por la ecuación:

$$F_c = S_o \cdot Q / V \cdot C_L \text{ (g DBO / g sólidos en lodos/día)} \quad (27)$$

Siendo:

$C_m$ : carga másica

$C_v$ : carga volúmica

$V$ : volumen del líquido en el reactor biológico, en m<sup>3</sup>

$C_L$ : concentración de los lodos o de los SVS en kg/m<sup>3</sup>

$v$ : sólidos volátiles

### 1.15.3. Parámetros de diseño

Para un correcto diseño y una operación adecuada de una estación depuradora de lodos activados, se tendrán en cuenta una serie de parámetros, tanto de diseño como operacionales, que relacionarán los distintos aspectos de la planta depuradora, a fin de optimizar las diferentes características que permiten alcanzar el objetivo propuesto.

- Edad de los lodos, tiempo de retención de los lodos (TRL) o tiempo de retención celular (TRC) es el tiempo medio, en días, que permanecen, en el reactor biológico, los lodos activados en suspensión, antes de pasar al sedimentador secundario. En términos técnicos, suele definirse como "la relación entre la masa de lodos activados existente en el reactor biológico y la masa de lodos eliminados por unidad de tiempo".

Si se supone constante la proporción de células microbianas en los sólidos volátiles en suspensión, se puede hacer entonces referencia a la edad de los lodos como el tiempo medio de retención de las células, o tiempo de retención celular.

En un sistema donde la cantidad total de lodos se considera constante durante un periodo de tiempo determinado, la cantidad de lodos eliminados es equivalente a la producción neta de los mismos. De esta manera, el TRC se fundamenta con la velocidad de crecimiento de los lodos, siendo por tanto, una medida de la actividad del lodo.

El tiempo de retención de los lodos debe ser el necesario para completar la biodegradación necesaria de los compuestos orgánicos y para facilitar a las células microbianas la mejora de su sedimentabilidad.

A medida que va aumentando la edad de los lodos, disminuye la carga másica ( $C_m$ ) y disminuye también la producción de los lodos, influyendo en el desarrollo del ecosistema, de forma que un tiempo de retención grande permite evolucionar al ecosistema en el sentido de aumentar la complejidad, lo cual implica una diversificación de la biocenosis, o comunidad biótica.

Por eso es muy importante lograr una buena relación entre la carga másica ( $C_m$ ), la edad de los lodos y la velocidad de crecimiento bacteriano.

Para calcular la edad de los lodos:

$$\text{Edad de los lodos (días)} = (V \cdot A_1) / (Q \cdot A_2) \quad (28)$$

Siendo:

V: volumen del líquido en el reactor biológico, en  $m^3$  o l.

Q: caudal de aguas negras en  $m^3/\text{día}$

$A_1$ : concentración de sólidos en suspensión en el reactor biológico ( $S_v\text{SLM}$ ) en  $mg/l$  o  $g/m^3$

$A_2$ : concentración de sólidos en suspensión de las aguas que entran en el reactor biológico en  $g/m^3$  o  $mg/l$ , incluyendo los lodos recirculados.

La selección de una edad de los lodos activados depende de la calidad del efluente que se quiera obtener. Existe una amplia región de operación de la edad de los lodos que sólo produce pequeños cambios en la calidad del efluente.

Por debajo de los 3 días, que es la edad mínima requerida, se produce el lavado de los predadores y la ruptura de los flóculos, disminuyendo la calidad del efluente.

A una edad mayor de 10 días, aumenta la posibilidad de ruptura de los flóculos por alteración de la biomasa y se produce la defloculación de los flóculos, aumentando la turbidez del efluente.

A medida que aumenta la edad de los lodos van entrando en acción nuevos parámetros, siendo el más significativo el comienzo de la nitrificación.

El tiempo de retención de los lodos, es función de la cantidad de lodos producida, mediante la fórmula:

$$\text{TRL} = V C_i / (Q_r C_c + Q C_e) \quad (29)$$

Siendo:

V: volumen del reactor biológico en  $m^3$

Q: caudal que entra en el reactor en  $m^3$

$Q_r$ : caudal de recirculación en  $m^3/\text{día}$

$C_i$ : SSLM en el reactor,  $mg/l$

$C_c$ : sólidos en suspensión en el sedimentador

$C_e$ : sólidos en suspensión del sobrenadante del sedimentador, en mg/l

La edad de los lodos se controla generalmente variando la razón entre los sólidos recirculados y los sólidos eliminados del proceso. Ambas clases de lodos pueden ser determinados, o en la línea de recirculación o como el SSLM del reactor biológico. El primero es lo más común. La mayor dificultad de este método es los que se tarda en analizar el líquido mezclado con los lodos recirculados. Durante este tiempo puede ocurrir, que la cantidad de lodos eliminados en un determinado instante, no se corresponda con la cantidad que en realidad debía eliminarse. Esos se evita tomando muestras compuestas de los lodos eliminados durante el periodo de operación, para confirmar que se ha eliminado la cantidad conveniente de lodos. Con esto se realiza raramente, la operación de la edad de los lodos de una planta puede ser diferente a la que el operador cree debe ser.

Otro método para controlar la edad de los lodos, conocido como control hidráulico, se realiza eliminando directamente el exceso de lodos del reactor biológico.

Generalmente se acepta que una planta de depuración por el proceso de lodos activados, está bien controlada cuando el tiempo de retención de los lodos se mantiene constante.

- Relación alimento a microorganismos (A/M). uno de los parámetros operacionales más significativo es el llamado factor de carga de los lodos o relación de alimento a microorganismos, donde la carga orgánica está relacionada con la cantidad de lodos que se encuentran en el reactor biológico, pudiendo equipararse a la energía disponible para su utilización por los microorganismos que se encuentran en los lodos activados, interviniendo, por tanto, en la actividad de los mismos. La relación A/M expresa la carga de nutrientes por unidad de tiempo y de masa de los lodos presentes en el reactor biológico.

Para lograr una óptima calidad del efluente, se debe tender a mantener lo más constante posible la relación A/M, pero como no es posible mantener constantes los dos factores, se deberá seleccionar uno u otro como parámetro de control. La concentración de la biomasa (M) se controla a través del proceso de recirculación y eliminación de los lodos activados, lo cual tiene por objeto proporcionar una concentración suficientemente de biomasa en el reactor biológico.

Como la relación de alimentos a microorganismos interviene en la determinación de la actividad de los lodos, debe estar relacionada con el tiempo de retención de los mismos, es decir que, si la actividad de los lodos aumenta, debido a que aumenta la concentración de nutrientes, la concentración de lodos eliminados deberá aumentar, reduciendo así su tiempo de permanencia. Por tanto, la relación A/M es, aproximadamente, inversamente proporcional al tiempo de permanencia de los lodos.

El término "relación de alimento a microorganismos" se usa también para describir la concentración de nutrientes eliminados de los lodos por unidad de masa. Para distinguir entre los dos usos, se le conocerá como un "factor de carga del proceso"  $F_p$  dado por:

$$F_p = Q (S_o - S_e) / V \text{ (g DBO / g sólidos en lodos/día)} \quad (30)$$

Donde:

$S_e$ : concentración residual de nutriente en el efluente.

El factor de carga de los lodos,  $F_{cr}$ , y el factor de carga del proceso,  $F_p$ , están claramente relacionados.

La relación  $A/M$  se representa por la siguiente ecuación:

$$A/M_v = Q / V [(L_i - L_e) / S_vSLM] \quad (31)$$

Siendo :

$A/M_v$  : carga orgánica en kg DBO<sub>5</sub> · día /kg  $S_vSLM$

Q: caudal medio en 24 horas

V: volumen del reactor en m<sup>3</sup>

$L_i$ : DBO<sub>5</sub> del agua de entrada en el reactor en mg/l

$L_e$ : DBO<sub>5</sub> del agua de salida del reactor en mg/l

$S_vSLM$ : sólidos en suspensión volátiles en el líquido mezclado del reactor en mg/l

Antes de calcular en una estación depuradora, el volumen del reactor biológico, se debe seleccionar la carga de DBO<sub>5</sub> o la relación  $A/M_v$  para el caudal de diseño al cual podrá funcionar la estación depuradora. La relación  $A/M_v$  puede controlar la cantidad del efluente final (por medio de sedimentabilidad conseguida con el lodo), el grado de eliminación de materia orgánica y la cantidad de lodos producida por kg de DBO<sub>5</sub> eliminada.

Si el valor de  $A/M_v$  está comprendido entre 0.75 y 1.00 d DBO<sub>5</sub> dia/g  $S_vSLM$  el tratamiento se denomina de alta carga.

La relación  $A/M_v$  es una función de la DBO<sub>5</sub> soluble en el agua de entrada, la cual tiene un efecto moderado sobre esa relación ( $A/M_v$ ) para valores de 0,25 a 0,5. Al aumentar ligeramente la DBO<sub>5</sub>, aumenta de la misma forma la relación  $A/M_v$ . este efecto es más acusado con los valores altos de  $A/M_v$  el cual está también afectado por el régimen del caudal en el reactor biológico.

- Concentración de sólidos en el líquido mezclado (SSLM y  $S_vSLM$ ). La concentración de sólidos en los lodos activados se puede expresar de maneras diferentes, cada una con un significado distinto.

Como una concentración de sólidos en suspensión, de modo que la concentración en el reactor biológico se puede mencionar en términos del valor de los "sólidos en suspensión en el líquido mezclado" o SSLM. Sin embargo, como algunos de los sólidos en suspensión pueden ser inorgánicos, no expresará claramente la presencia total de nutrientes. Se calcula por medio de la ecuación:

$$SSLM = g \text{ lodos } /m^3 \text{ del reactor} \quad (32)$$

Como el contenido en material biodegradable presente, conocido como  $S_vS$ , los cuales se relacionan con la concentración microbiana en los lodos activados. La concentración de los lodos activados en la etapa de aireación se expresa entonces como "sólidos volátiles en suspensión en el líquido

mezclado". Esta expresión indica la cantidad de materia orgánica presente, pero no establece distinción entre el material bioquímicamente activo y el material orgánico inerte presente en los lodos. La proporción de  $S_vS$  debida a los microorganismos activos dependerá de las condiciones de operación de la planta y de la cantidad de  $S_vS$  en el agua residual influente. Como sucede con los valores de  $DBO_5$ , el valor de  $S_vS$  se deberá usar con una cierta cautela, si bien proporciona una base útil para la comparación de procesos similares. Los valores más altos de  $S_vSLM$  están limitados por la sedimentabilidad de los lodos activados, siendo valores típicos de operación de 2 a 3 kg de sólidos de los lodos por  $m^3$ .

El exceso de sólidos producidos por un sistema de lodos activados, es equivalente a la suma de los sólidos, no degradables, de entrada y de los sólidos volátiles netos sintetizados en el proceso de tratamiento.

La cantidad de sólidos volátiles totales es igual a los sólidos sintetizados menos los que se han oxidado por la respiración endógena.

En un agua residual urbana, la cantidad de sólidos volátiles no degradables, más los sólidos sintetizados, se pueden calcular con la fórmula siguiente:

$$S_w = a \cdot F - b \cdot S_v \quad (33)$$

En donde:

$S_w$ : exceso de  $S_vS$  producidos en kg/día

$F$ :  $DBO_5$  eliminada =  $Q (L_i - L_e)$  kg/día

$S_v$ :  $S_vSLM$  totales del reactor, en kg

$a$  y  $b$  son constantes cuyo valor depende de si se ha realizado o no tratamiento primario.

El total de sólidos en suspensión producidos, en g/día, se calcula dividiendo el valor de  $S_w$  por la relación de  $S_vSLM$  a  $SSLM$ .

Si los  $S_vSLM/SSLM$  es igual a 0,75, el total de sólidos en suspensión en exceso será:

$$S_s = S_w / 0,75 \quad (34)$$

Cantidad neta de sólidos en suspensión producidos en exceso.

## 1.16. Recirculación

La formación de lodos activados o flóculos en las aguas residuales es un proceso lento, por lo que es muy pequeña la cantidad de estos lodos activados formada durante su tratamiento.

Para obtener la cantidad necesaria de lodos activados, a fin de que sea eficaz la depuración, se sedimentan los lodos producidos por las aguas tratadas en el sedimentador secundario y se utilizan posteriormente para el tratamiento de nuevos volúmenes de aguas a depurar. Los lodos que se reutilizan en esta forma se conocen como lodos recirculados.

El grado de recirculación se puede calcular, conociendo el IVL:

$$Q_r / Q = 100 / [ (IVL / x \cdot 100) - 1 ] \quad (35)$$

Siendo:

x: SSLM en 100

$Q_r$ : caudal recirculado

Q: caudal total

Las variaciones en las características y concentración de las aguas residuales, así como el tipo de plantas, hace que la cantidad de lodos recirculados pueda variar desde 10 hasta 50 % del volumen de afluente. Para una planta convencional, el porcentaje varía entre un 10 y un 20%.

El parámetro de recirculación de los lodos activados contribuye a proporcionar una concentración suficiente y aproximadamente constante de biomasa en el reactor biológico, siendo su valor un factor importante para mantener correcta la razón A/M o la edad de los lodos.

El porcentaje necesario para mantener la concentración adecuada de SSLM en el reactor se calcula haciendo su balance de masas:

$$Q_r = Q \cdot S_s / (C_s - S_s) = R \cdot Q \quad (36)$$

Siendo:

$Q_r$ : caudal de recirculación en m<sup>3</sup>/día

Q: caudal del agua residual, en m<sup>3</sup>/día

$S_s$ : SSLM que entran en el sedimentador

$C_s$ : concentración de lodos en el sedimentador

R: porcentaje de recirculación =  $S_s / (C_s - S_s)$

Resulta ventajoso concentrar los sólidos del líquido mezclado del reactor biológico, tanto como sea posible para reducir el caudal del bombeo de lodos recirculados, cuya capacidad debe ser, al menor, igual al 100% del caudal de entrada Q, si los SSLM no sedimentan bien y el valor de  $C_s$  es igual a  $2 \cdot S_s$ .

## 1.17. Variaciones

Existen diferentes versiones del proceso de lodos activados, en donde se origina una versatilidad para adaptarse a un amplio rango de necesidades del tratamiento. Consisten en diferentes combinaciones de maneras de operación, regímenes de mezcla, sistemas de aireación y niveles de carga.

### 1.17.1. Sistema convencional

En este sistema se utiliza un reactor en el que se crea un ambiente aerobio por medio de aireadores. Una vez que las aguas residuales han sido tratadas en el reactor biológico, la masa biológica resultante se sedimenta en el sedimentador secundario. El lodo activado separado en el mismo se recircula al reactor biológico para mantener una concentración adecuada del mismo.

### 1.17.2. Proceso de mezcla completa

Se llama así al sistema donde el agua residual a depurar y el lodo recirculado se introducen en distintas zonas del reactor utilizando un canal central, aireándose

la mezcla conforme pasa desde su introducción a los canales laterales de salida. El efluente, lo mismo que en el sistema convencional, es sedimentado y recirculado los lodos, eliminándose el exceso. Este sistema puede utilizar una sedimentación previa o aguas sin sedimentar.

#### *1.17.3. Aireación gradual*

El objetivo de este sistema es hacer coincidir la cantidad de aire suministrado con la demanda de oxígeno ejercida por los microorganismos. Afecta solamente a la disposición de los difusores en el tanque de aireación y a la cantidad de aire consumida.

#### *1.17.4. Aireación escalonada*

En este proceso, las aguas residuales a depurar se introducen por varios puntos, en lugar de hacerlo por uno solo, en el reactor biológico. Este se subdivide en varios canales paralelos separados por medio de deflectores. Cada canal es una dase y varios de ellos se conectan entre sí en serie. Los lodos recirculados entren en el primer escalón del tanque junto con una porción de agua residual sedimentada.

En este sistema la demanda de oxígeno se distribuye más uniformemente a todo lo largo del reactor biológico, dando como resultado una mejor utilización del oxígeno suministrado.

#### *1.17.5. Aireación prolongada*

También llamado impropriadamente de oxidación total, se utiliza cuando la carga orgánica es relativamente baja y el tiempo de aireación muy elevado. Es aplicable a pequeñas plantas de tratamiento de capacidad menor de 3800 m<sup>3</sup>/día. Generalmente se utiliza con aguas no sedimentadas previamente y sin purga de lodos.

Debido a los largos tiempo de retención puede tener lugar un alto grado de nitrificación. Este proceso, por tanto, tendrá unas necesidades de oxígeno muy altas, ya que se utilizará para síntesis y oxidación de los sólidos microbianos y para nitrificación. De esta forma se realizan en el mismo depósito la coagulación de los sólidos en suspensión y la estabilización de los lodos activados.

#### *1.17.6. Canales de oxidación*

Es una variante del sistema de aireación prolongada. Consiste en que el reactor biológico es un canal de forma angular, de unos 90 cm de profundidad en el que se coloca uno o más rotores transversales para proporcionar la aireación y circulación del agua. El agua residual circula a una velocidad entre 0.1 y 0.5 m/s aproximadamente.

#### *1.17.7. Estabilización – contacto o doble etapa*

Este proceso se desarrolló para aprovechar las propiedades de absorción de los lodos, y se basa en establecer, antes de mezclar los lodos activados con el agua bruta a depurar, una cámara de oxidación de los lodos, dividiéndose el proceso en dos etapas: activación de los lodos y mezcla de los mismos con las aguas residuales a depurar, en el reactor biológico.



En el proceso de lodos activados, se admite que la eliminación de la DBO tiene lugar en dos etapas: una primera de absorción en que la mayor parte de la materia coloidal y orgánica disuelta es absorbida en los lodos y una segunda fase en que tiene lugar la oxidación y asimilación metabólica. En el proceso de lodos activados estas dos fases tienen lugar en un reactor único. En esta variante, las dos fases son separadas y tienen lugar en reactores diferentes. Para ello, el lodo que se recircula se activa antes de entrar en el reactor, aireándose en un depósito distinto para que las bacterias se desarrollen en ausencia de alimento. De esta forma, cuando el lodo aireado se introduce en el reactor biológico para mezclarlo con las aguas residuales a depurar, las bacterias hambrientas realizan, muy rápidamente, la floculación de la materia orgánica.

#### *1.17.8. Proceso KRAUS*

Las aguas residuales deficientes en nitrógeno son difíciles de tratar por el procedimiento de lodos activados. La solución más utilizada consiste en airear con el sobrenadante del digestor de lodos, el lodo digerido y una parte del lodo recirculado en un tanque de reaireación, durante 24 horas, oxidándose el nitrógeno amoniacal a nitrato, el cual es mezclado con el lodo activado recirculado. De esta forma el nitrato del sobrenadante aireado corrige la deficiencia de nitrógeno y los sólidos pesados contenidos en el fango digerido mejorarán la capacidad de sedimentación del líquido mezcla.

#### *1.17.9. Oxidación con oxígeno puro*

Se ha utilizado el oxígeno puro como sustituto del aire, en el proceso de lodos activados. Los tanques de aireación son cerrados y el oxígeno introducido se recircula.

Con este proceso se aumenta la actividad bacteriana, decrece el volumen de lodos y el volumen del tanque de aireación se reduce en un 30 %.

## **1.18. Lodos**

En los procesos de depuración de las aguas residuales (lodos activados, biológicos y biodiscos) se generan lodos en cantidades variables, mayor cantidad en los lodos activados, que plantean grandes problemas, debido a las dificultades de manipulación y estabilización de la materia orgánica y a la dificultad de su posterior eliminación sin causar graves daños al medio ambiente. Hay que señalar aquí que en la depuración ecológica (DEPURECO) no se forman lodos activados, encontrando únicamente los sólidos en suspensión de las aguas residuales a depurar.

Debido a la formación de lodos, no se puede concebir el tratamiento biológico como una operación, sino como una combinación de operaciones interrelacionadas.

Los lodos presentan características muy diversas, según sea la procedencia y su estado.

Antes de cualquier explicación debe quedar clara la distinción entre los lodos formados en el proceso de depuración y los sólidos en suspensión que llevan las aguas residuales a depurar.

El alto contenido en materia orgánica que contienen los lodos hace que sea necesario acondicionarlos según el destino al cual valla destinado; en forma líquida para abono, inyección en el subsuelo, vertidos al mar, etc.

### 1.18.1. Composición

Las características de los lodos dependen de los tratamientos a los que han sido sometidos. Generalizando, los lodos están formados por:

- Una fase sólida, constituida por materia orgánica (70 %) e inorgánica (30 %). Está formada por todos los sólidos en suspensión y disueltos, que se transformarán en sólidos en suspensión, que llevan las aguas del afluente.
- Una fase líquida que lleva disuelta la materia orgánica e inorgánica. Los lodos frescos presentan un color gris amarillento y están formados, principalmente, por materias fecales y residuos varios. Los lodos diferidos presentan un color oscuro debido a la sulfuro de hierro.

Los lodos obtenidos en el tratamiento primario están formados por la materia orgánica que se ha podido decantar y sedimentar. Su concentración suele ser de 6000 a 8000 mg/l.

Los lodos secundarios están constituidos fundamentalmente por microorganismos. Su concentración de materia orgánica es aproximadamente de 10000 mg/l.

Su contenido en agua es del orden de 95 – 98 %, lo que hace que su manejo sea complicado, no debiendo ser vertidos a ningún cauce por la enorme contaminación que producirían.

Para poder eliminarlos, se deben conseguir tres objetivos:

- Reducir el volumen para facilitar el manejo
- Estabilizar al máximo la materia orgánica
- Lograr una deshidratación parcial, con un contenido de agua entre el 70 y el 80 %.

Para obtener un adecuado nivel de degradación de los lodos debemos tener en cuenta la temperatura y el volumen del reactor, ya que estos parámetros influirán en el tiempo de permanencia, y por tanto, en la posterior eliminación.

Los lodos deben ser espesados hasta el mayor grado posible, para reducir su volumen, permitiendo este hecho que aumente el tiempo de permanencia.

La reducción del volumen puede hacer mediante espesamiento, deshidratación o incineración.

- Espesamiento por decantación. La suspensión de lodos se introduce en un espesador, donde permanece bastante tiempo, produciéndose un asentamiento del lodo y eliminándose así hasta 4/5 partes de agua.
- Espesamiento por elutriación. La elutriación consiste en la extracción de compuestos orgánicos e inorgánicos mediante un lavado del lodo con agua, con el fin de mejorar las características físicas o químicas de la suspensión, lo que permite reducir la cantidad de productos químicos que se utilizarán como coagulantes en el acondicionamiento químico.

- Espesamiento por flotación. Esta técnica permite la reducción de la superficie y del volumen de las cubas de espesamiento y la obtención, con lodos de origen coloidal, de concentraciones superiores a las obtenidas por espesamiento estático.
- Deshidratación por filtración. El secado de lodos por filtración es el sistema más utilizado. Consiste en un simple drenaje sobre los lechos de arena o en una filtración mecánica en vacío o a presión.
- Deshidratación por lechos de secado. El secado de lodos sobre lechos de arena es la técnica más empleada en instalaciones pequeñas. Los lechos de arena están constituidos por una capa de arena sobre una capa soporte de grava. El sistema de drenaje bajo la capa soporte está formada por tuberías de cemento o gres. El número y pendiente de los desagües debe ser lo suficientemente elevada para asegurar un drenaje homogéneo.
- Incineración. Con este proceso se pretende recuperar el poder calorífico que tienen los compuestos orgánicos que contienen los lodos, reduciendo considerablemente su masa y volumen.

Un lodo no tiene que ser sometido a todas las operaciones y procesos de tratamiento, sino que su aplicación dependerá de las características del lodo.

### *1.18.2. Destino final*

Para tomar esta decisión hay que tener en cuenta el impacto que pueden causar en el medio ambiente y las características técnicas de la zona.

Los métodos más comunes de eliminación son:

- En pequeñas instalaciones suele fabricarse compost, mezclándolo con residuos sólidos urbanos.
- Descarga en un vertedero, lo cual va desde un simple "estanque de lodos" cuyo drenaje y evaporación necesita meses o años, hasta el terraplenado de excavaciones.
- El vertido al mar se realiza de manera discontinua o mediante un colector submarino.
- Otro sistema es la incineración

### *1.18.3. Cantidad*

En general, las características del agua influyen mucho en la producción de lodos, ya que el agua con mayor cantidad de alimentos producirá más lodos.

En relación con el oxígeno, se ha comprobado que con bajas concentraciones de oxígeno disuelto se incrementa la producción de lodos en los procesos biológicos. Manteniendo concentraciones de oxígeno disuelto iguales o superiores a 2 mg/l, la producción de lodos es independiente del sistema de aireación.

La temperatura también influye en la producción de lodos. A temperaturas inferiores a 15 °C la producción de lodos aumenta, no apreciándose diferencias a mayores temperaturas.

### *1.18.4. Características*

Las características son muy variables según sea el tipo de lodos, debiendo hacer un estudio específico en cada caso.

Las características físicas más importantes el peso específico, la concentración de sólidos, la sedimentabilidad, el tamaño de las partículas que forman los lodos, la viscosidad, resistencia específica, etc.

En relación con las características químicas son el poder calorífico, el valor fertilizante (presencia de nitrógeno y fósforo), el contenido en metales pesados, etc.

Las características biológicas más significativas son la taxonomía y la patogeneidad.

#### *1.18.5. Estabilización*

La estabilización de la materia orgánica se logra cuando se han biodegradado las sustancias orgánicas fácilmente biodegradables, provocando una degradación anaerobia con la consiguiente producción de malos olores.

La estabilización de los lodos puede realizarse mediante:

- Digestión aerobia o anaerobia. Se disminuye el volumen de los lodos a la vez que se descompone la materia orgánica biodegradable.
  - o La digestión aerobia consiste en someter el lodo a una aireación mediante difusores, consumiendo mucha energía.
  - o La digestión anaerobia ha sido el método más empleado, pudiéndose obtener hasta un 50 % de reducción del contenido orgánico de los lodos.
- Pasteurización
- Incineración

# **CAPÍTULO 4: DEPURACIÓN BIOLÓGICA POR BIOPELÍCULA**

También denominados sistemas de película biológica o biomasa fija.

Las bacterias aerobias forman una película biológicamente activa, formada por el agua residual a depurar, que contiene microorganismos y nutrientes. Esta película se desarrolla cuando se ponen en contacto al agua residual con unas superficies, fijas o móviles.

En los sistemas de película fija el agua residual pasa a través de un lecho fijo (lechos biológicos), y se definen como un sistema de medio fijo que consta de un reactor biológico donde se pone en contacto el oxígeno, el agua residual con materia orgánica a depurar y los microorganismos. En los segundos, el lecho es móvil (biodiscos).

## **1.19. Lechos biológicos**

También son llamados filtros biológicos, filtros percoladores, biofiltros, filtros de goteo, filtros de escurrimiento o de percolación, lechos bacterianos, etc.

No se realiza ninguna filtración y en el proceso biológico que se realiza no sólo actúan bacterias, sino que lo hace una fauna variada; razón por la cual se les suele denominar más apropiadamente lechos biológicos.

Se define como lecho biológico un reactor de forma rectangular o circular, colmatado con un medio de relleno no meteorizable, que pone en contacto las aguas residuales a depurar, previamente sedimentadas, y aire con cultivos biológicos.

Para ello, el medio sólido que hace de soporte, está dispuesto dentro de un depósito, rellenándolo a través del cual gotea al agua residual y donde el aire circula libremente a través de los huecos. La biodegradación se produce al hacer circular libremente, a través del medio de soporte, al agua residual y el aire en contracorriente. La circulación del aire se realiza en forma natural o forzada.

Las superficies mojadas del medio sólido de relleno desarrollan una película microbiana, que en general no debe tener un espesor mucho mayor de 3 mm., ya que espesores mayores no se puede asegurar la penetración del oxígeno. El agua residual discurre por la superficie del relleno en una delgada capa que está en contacto, por un lado con la película microbiana y por otro, con el aire que ocupa los espacios que ha dejado el relleno. El oxígeno aportado por el aire disuelto en el agua residual a depurar en movimiento, es transferido desde la capa líquida a la película microbiana, donde con los nutrientes que vehicula el agua residual se difunden hacia el interior de la película biológica, para ser metabolizados por la población microbiana. Los sólidos en suspensión y los coloidales de las aguas residuales se aglomeran y absorben también por la película microbiana. En resumen, en lecho biológico es un sistema de cultivo de microorganismos fijos, adheridos a un medio granular a través del cual se hace pasar, intermitente o continuamente, el agua residual a depurar.

Al pasar el agua, arrastra parte de la película biológica (autolimpieza), esencialmente subproductos de la actividad de los organismos asociados a ella, siendo preciso proceder posteriormente a su separación mediante una sedimentación final.

La ventaja de los lechos biológicos en relación con otros sistemas, es que sólo se consume energía en la transferencia del agua residual al reactor biológico y en la recirculación.

Los elementos fundamentales de los lechos biológicos son los mecanismos que permiten la distribución uniforme del agua residual, los medios de relleno donde va a fijarse el film biológico, el mecanismo de recogida del agua depurada y el de ventilación.

## **1.20. Afluente**

La inyección del agua residual debe ser lo más uniformemente posible a fin de evitar atascos y paradas inoportunas para el buen funcionamiento del lecho. Para ello se utilizan los aspersores, que pueden ser fijos o móviles.

Los dispositivos fijos, que requieren un complicado dispositivo de distribución, tienen una pérdida de carga de alrededor de 2 metros. Los móviles consisten en cuatro o más brazos giratorios, dispuestos radialmente, con boquillas incorporadas y movidos por cargas hidráulicas, siendo la pérdida de carga del orden de 0,5 metros. La velocidad de giro va de 0,3 a 5 vueltas por minuto, dependiendo de la carga superficial.

En general, existe una tendencia a que las unidades pequeñas tengan sistemas fijos de distribución del agua residual a depurar, y que las unidades grandes tengan distribuciones móviles. Los dos tipos de distribución originan diferentes regímenes hidráulicos dentro del relleno, lo que puede afectar al funcionamiento del reactor.

El agua residual debe estar sedimentada antes de entrar al reactor, lo que permite aprovechar al máximo su capacidad. Los sólidos en suspensión, orgánicos en su mayor parte, no son separados, en su mayoría, de las aguas residuales en la sedimentación, convirtiéndose en lecho, mediante hidrólisis, en parte integrante de los organismos vivos o de la materia orgánica estable que se adhiere temporalmente al medio filtrante.

La recogida de agua residual depurada se efectúa por medio de un dispositivo de drenaje, situado en el fondo del lecho, el cual dispone de un sistema de canales dispuestos de tal suerte que no pueda haber sedimentación en los mismos, para lo que la pendiente de diseño debe ser del 1 al 2%. Además, la sección de los canales debe ser tal que nunca valla llena, ya que deberá servir también como canal de aireación. Una recomendación de diseño señala que la zona de salida del falso fondo del agua y del aire, sea del 15 al 10 % de la superficie total del reactor.

## 1.21. Condiciones del relleno

Los medios de relleno se eligen de manera que presenten, por una parte, una superficie de contacto muy grande entre la lámina de líquido y el aire, y por otra, entre el líquido y el film biológico, aumentando así la transferencia de nutrientes y oxígeno a los microorganismos.

La superficie específica se define como "los metros cuadrados de superficie de relleno por metro cúbico del volumen total". A mayor superficie específica, más biomasa se encontrará por unidad de volumen. Por otra parte, a mayor tanto por ciento de huecos se admiten mayores cargas hidráulicas sin peligro de inundación, ya que se facilita el flujo. La superficie específica hay que conjugarla con el índice de huecos, ya que éstos serán los que permitirán el paso del agua residual y del aire.

El objetivo es lograr la mayor superficie específica posible y el mayor índice o porcentaje de huecos en el lecho, a fin de aumentar la biomasa y la circulación del aire.

Los tipos de relleno común se pueden clasificar en dos grupos:

- Medios minerales o convencionales
- Medios especialmente fabricados, generalmente plásticos, que a menudo se suele llamar de alta carga.

Hay que señalar que la biopelícula que se desarrolla en los medios plásticos es ecológicamente similar a la que se forma sobre los medios minerales.

Piedra no meteorizable, cascotes de ladrillo, escorias, trozos de cerámica, cock, carbón mineral, tobas volcánicas, material de plástico de formas regulares, rígido y ligero, de gran porosidad, con algunos de los materiales de relleno más usados.

Es imprescindible que sea un material con una alta relación superficie a peso, con un alto porcentaje de huecos para permitir el paso del aire, resistente al clima y no sufrir daño o desintegración por su exposición al agua, aire, frío, o a los organismos biológicos que crecen en su superficie.

El tamaño de los granos debe ser de 4 a 6 cm.

Además, debe tener en su superficie una aspereza tal que facilite la adhesión de la película biológica y crezca sobre éste soporte.

No se debe olvidar que ciertas partes de la superficie, dentro del relleno, no se mojan nunca o que se mojan de manera intermitente y por lo tanto no soportan el crecimiento del film biológico.

Las diferencias entre distintos lechos se basan principalmente en el material utilizado como relleno y en la forma como se aplica al lecho el agua residual a depurar.

Para los rellenos comunes (roca, tobas volcánicas, etc.) las características normales son las siguientes: 4-5 cm. De área superficial específica; 80-110 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> de volumen global; 45-55 % de huecos y  $2.4 \cdot 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> de carga máxima.

Las ventajas de los rellenos sintéticos son:

- Permiten profundidades de relleno de hasta 12 metros
- Se puede llegar a cargas hidráulicas elevadas, de hasta  $2.8 \cdot 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> s.
- Tienen superficies específicas de hasta 220 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> del volumen total
- Existe un riesgo menor de obstruirse por las aguas residuales que arrastran en cantidades importantes de sólidos en suspensión
- Debido a su ligereza, requieren una estructura totalmente barata como soporte

Los inconvenientes son:

- Su precio, relativamente elevado
- Los rendimientos no están en consonancia con su costo

## 1.22. Aireación

La aireación del lecho tiene lugar por convección natural, debido, entre otras razones, a la diferencia de temperatura entre el aire que permanece en el relleno y el de la atmósfera circundante. A veces, para incrementar el aporte de oxígeno, es necesario recurrir a la convección forzada.

En relación con la ventilación natural, se ha comprobado que una diferencia de temperatura de 6 °C produce un tiro de 0,3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> min. Cuando la diferencia es de 2 °C se para el tiro. Si se prolonga la duración, se podrán producir efectos de anaerobiosis.

La ventilación forzada se logra inyectando aire en una proporción igual o superior a 0,3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> min., recurriendo a esta ventilación forzada cuando hay peligro de cerrar los lechos por diversas causas, como por ejemplo, el frío. En general, para el buen funcionamiento de los lechos, se deben realizar aireaciones frecuentes, a fin de suministrar a la masa biológica del filtro, el oxígeno necesario mantener la



aerobiosis en la microflora, facilitando que la materia orgánica disuelta en el agua residual y el oxígeno del aire lleguen hasta los microorganismos asimiladores, facilitando, por otra parte, la eliminación de los subproductos y del anhídrido carbónico formado.

## 1.23. Dimensiones del lecho

Las dimensiones del lecho en el que se dispone el medio sólido que hace de soporte dependen de la naturaleza del medio y de la concentración y tipo del agua residual a depurar.

El general, la altura debe estar en relación con el tamaño de los granos del material de relleno, a fin de facilitar el paso del aire y las impurezas que contiene el agua a depurar.

En relación con la carga, a mayor carga del agua residual mayor altura del lecho, a fin de lograr que sea mayor el tiempo de permanencia y su recorrido. Con buena ventilación, pueden conseguirse lechos de muy buen funcionamiento con alturas de hasta 8 metros, aunque es mejor y más ventajoso disponer de lechos en dos etapas.

## 1.24. Clasificación de los lechos

Se clasifican según la carga hidráulica u orgánica, en los de carga normal o baja carga o lechos de goteo y los de alta carga o lechos de lavado.

Se denomina carga hidráulica al volumen total de agua residual, en  $m^3$ , incluyendo la recirculación, que se trata en el reactor por  $m^2$  de lecho y hora o día.

La carga orgánica son los kilogramos de  $DBO_5$  o DQO por  $m^3$  de lecho y día.

En los lechos de carga normal, el efecto de lavado es muy pequeño, y al quedar adherida al soporte la población microbiana, se va recubriendo de membranas sucesivas, desgarrándose únicamente las capas exteriores, vivas o muertas, quedando colgadas de las capas anteriores, por lo que siguen consumiendo oxígeno en su biodegradación dentro del lecho y le dan tiempo a sufrir una acusada mineralización. Por esto el espesor de la membrana biológica es mayor a 4 mm., ya que a lo sumo sufren el efecto de arrastre las capas superficiales. En esencial la acción de los predadores, ya que con la autooxidación de las bacterias, ejercen su acción controlando el espesor del film y evitando, por tanto, la colmatación.

En los lechos de alta carga, la acción de lavado es más enérgica, la película biológica es más delgada por ser arrastradas por el agua, con más facilidad, las capas biológicas superficiales, sufriendo una menor biodegradación las sustancias sólidas formadas a partir de los compuestos orgánicos disueltos en el agua residual, debido a su menor tiempo de permanencia, por lo que se pueden depurar mucha menor cantidad de efluente. Por otra parte, el agua que sale de estos lechos (lechos de lavado), contiene muy pocos nitratos, aspecto que caracteriza a los lechos de baja carga (lechos de goteo) con lodos que presentan elevada concentración de nitratos.

Por eso se comprende que los lechos de alta carga puedan depurar mucha más cantidad de agua residual, porque el lecho queda liberado del problema de descomponer en su interior las sustancias sólidas formadas a partir de las sustancias disueltas, ya que al lavarse continuamente son arrastradas por el efluente, dejando el trabajo de su biodegradación a otras instalaciones, como por ejemplo, un digestor, indispensable en este tipo de instalaciones, ya que los lodos formados suelen tener un contenido del orden del 75 al 80 % de materia orgánica y deben ser tratados por digestión anaerobia.

La característica del lecho de alta carga es, por lo tanto, estar la biomasa libre de lodos como consecuencia del lavado, no solamente del lavado mecánico, sino también de un cierto grado de renovación periódica del agua del interior y el exterior de la membrana bacteriana, necesario en los procesos biológicos. Por otra parte, los compuestos de nitrógeno no pueden sufrir la nitrificación por falta de tiempo.

**Tabla 5.** *Ventajas e inconvenientes de los lechos de carga alta y normal.*

<b>Carga normal</b>	<b>Alta carga</b>
Ventajas	
funcionan por gravedad son de operación simple no precisan recirculación reducción muy alta de DBO5 se produce nitrificación	gran capacidad de tratamiento  no presentan, prácticamente, las desventajas de los de carga normal.
Desventajas	
facilidad de encharcamiento  facilidad de taponamiento  genera olores  problemas de moscas	mayor complejidad operación  para su funcionamiento se necesita energía (bombeo) y recirculación  hay que hacer dilución, regulación de caudales punta y aumento del tiempo de contacto

## 1.25. Puesta en marcha

Para el establecimiento de una película biológica bien equilibrada en un medio de soporte limpio, se requiere un periodo de tiempo variable, según sea la temperatura ambiente, que puede ir de unas pocas semanas en verano a algunos meses en invierno, debido a la lenta proliferación de los microorganismos. Después de la maduración, los materiales de relleno se han

recubierto de una película biológica, gelatinosa, que forma una especie de tapiz de 3 a 4 mm. de espesor.

Esta película biológica se desarrolla a partir de los organismos presentes en las aguas residuales o inoculados en ella. En un principio, la depuración es mínima, aumentando a medida que se va formando la película biológica, la cual se va haciendo más gruesa hasta que es lo suficientemente pesada para separarse por su propio peso, siendo arrastrada por el flujo de líquido fuera del sistema en forma de lodo floculante. A estos productos biológicos desprendidos se les suele llamar impropriamente humus, debido a su aspecto.

El lodo arrastrado por el efluente tratado, se separa por sedimentación, bien en el tanque colector del agua depurada o en un sedimentador que hará de sedimentador secundario. Hay que tener en cuenta que si no hay oxígeno suficiente en el tanque colector, se pueden producir condiciones anaerobias con la consiguiente producción de malos olores.

Según se deduce de lo anteriormente explicado, los procesos biológicos que se desarrollan en este tipo de reactor son, como los de un proceso de lodos activados, una combinación y aglomeración de materiales en la masa biológica, oxidación biológica de los nutrientes y conversión de los nutrientes en masa biológica.

## 1.26. Eliminación de la materia orgánica

Así como en los lodos activados el requisito fundamental para que se efectúe la eliminación de la materia orgánica es el contacto íntimo del agua residual con la biomasa en presencia de oxígeno, en los lechos biológicos el agua entra en contacto con la película biológica adherida al medio y el oxígeno es suministrado por corrientes de aire que atraviesan el lecho, ya sean inducidas naturalmente por diferencia de temperaturas entre la parte superior y la inferior de aquel, ya sea artificialmente por medio de ventiladores. No obstante, los procesos biológicos y bioquímicos que tienen lugar, son prácticamente los mismos en ambos sistemas.

Al aplicar el agua residual a la superficie de un lecho biológico, parte del agua atraviesa más o menos rápidamente aquel, mientras que el resto lo hace muy lentamente. La materia suspendida o coloidal es adsorbida en la película biológica, mientras que la soluble es progresivamente eliminada de la porción de agua que tiene un tiempo de estancia mayor en el sistema. Las sustancias disueltas pasan directamente al interior de los organismos por difusión, mientras que la materia en suspensión o la coloidal es hidrolizada en formas más sencillas que hacen posible su paso al interior de las células. De aquí que el tiempo de retención deba ser el necesario para asegurar la transferencia de la materia orgánica disuelta al film biológico. Puesto que el tiempo de retención depende de la carga hidráulica a que se somete el sistema, es evidente que la eliminación de la  $DBO_5$  está en relación con la citada carga. Si es alta sólo se podrá eliminar la materia en suspensión y la coloidal y muy poco la soluble, mientras que a bajas cargas, el tiempo de retención es suficiente para eliminar o estabilizar la materia orgánica disuelta.

Como se ha citado, las partículas sólidas presentes en las aguas residuales a depurar, pueden ser atrapadas en el relleno, pero si la concentración de

partículas sólidas es grande, el relleno puede quedar bloqueado, con el consiguiente freno del flujo de líquido a través del lecho, interrumpiendo el funcionamiento del sistema: hay encharcamiento.

La superficie de contacto, entre el oxígeno y el líquido y entre el oxígeno y la biomasa, es prácticamente constante y se puede evaluar con bastante aproximación. No obstante, se debe tener en cuenta el hecho de que no toda la superficie de relleno está mojada, y se utiliza por tanto para el crecimiento de la película activa, y que también hay flujo desigual a través del lecho, hay "canalización", lo cual dificulta el pronóstico del funcionamiento. La superficie recubierta por el film o superficie regada por  $m^3$  de lecho, depende del relleno utilizado, pudiendo ir de 90 a 200  $m^2$  por  $m^3$ .

## 1.27. Microbiología

El film adherido al relleno en los lechos biológicos consiste en un sistema microecológico de bacterias, hongos, protozoos y alguna microfauna. Bacterias heterótrofas, generalmente próximas a la superficie del filtro y autótrofas (nitrificantes), cerca del fondo. En las capas superiores, se nota frecuentemente la presencia de hongos, protozoos y de algas verdes.

Las aguas negras determinan un predominio neto de las bacterias, apareciendo los hongos cuando se tratan las aguas residuales industriales, en la zona superficial del lecho (*Fusarium*, *Aqueductum*, *Oospora*, *Sepedonium*, *Ascoidea*, *Sporotrichum*). Se cree que *Fusarium* y *Geotrichum* son los primeros que colonizan el material del lecho, creando un ambiente adecuado para un asentamiento posterior del *Sepedonium* y *Ascoidea*. El *Fusarium* predomina en la superficie, al competir con éxito con las algas. El *Geotrichum* se encuentra en las partes bajas del lecho, excepto cuando se dan condiciones de oscuridad, ya que la ausencia de algas y por tanto de su acción inhibidora, permite su presencia en la superficie.

En relación con las algas, puesto que colonizan sólo la superficie de los lechos, se puede deducir que su importancia no es fundamental en el proceso de la depuración de los compuestos orgánicos. Las formas más comunes que se encuentran son la cianofíceas (*Phormidium*) y clorofíceas (*Ulotrix*, *Stigeoclonium*, *Monostroma*). Asociadas con éstas se encuentran también tipos unicelulares (diatomeas).

La fauna predatora es abundante, presentándose protozoos y animales más evolucionados como gusano, larvas de insectos, arácnidos, caracoles, etc.

Las bacterias presentes corresponden a las formadoras de zoogleas y a formas filamentosas (*Sphaerotilus* y *Beggiatoa*). Se han aislado bacterias capaces de oxidar fenoles, tiocianatos, tiosulfatos y cianuros.

Los hongos son más abundantes que en los lodos activados, debido probablemente a un ambiente físico más propicio para su desarrollo.

Como las aguas negras en proceso de depuración cambian su composición según pasan a través del lecho, los diferentes sustratos del relleno estarán en contacto con los líquidos de diferente composición. El equilibrio ecológico de los organismos en la biopelícula variará, por lo tanto, dentro del lecho. Esto permite la existencia de un rango más amplio de especies en el lecho que en sistemas

de mezcla, y la distribución estratificada de las especies dentro del relleno contribuyen a la capacidad de los lechos biológicos para resistir cargas de choque.

El rango y proporción de las diferentes especies de organismos presentes dependen de las condiciones de operación del sistema, en especial de la carga y de los nutrientes presentes. Sin embargo, la película microbiana de los lechos biológicos es más compleja que, por ejemplo, los lodos activados. El equilibrio entre las especies presentes varía también con su situación en profundidad dentro del lecho, y cuando la unidad está al aire libre, el equilibrio ecológico mostrará también variaciones estacionales. El film biológico interviene en la compleja serie de cadenas alimenticias y relaciones entre el predador y la presa, desde las bacterias hasta los insectos, teniendo cada una de ellas un significativo efecto en la operación de los lechos.

En función del espesor del film biológico, puede desarrollarse, debajo de la capa aerobia, una anaerobia. Generalmente se acepta que el régimen es el laminar para la carga hidráulica normalmente encontrada durante la operación del lecho biológico. Se acepta también que el espesor de la zona aeróbica está limitada por la capacidad de penetración en profundidad del oxígeno en el film, el cual depende: del coeficiente de difusividad del mismo, de la concentración del oxígeno en la interfase sólido-líquido y de la razón de su utilización por los microorganismos presentes en el film biológico. Para una determinada razón de flujo y aguas residuales con alta carga orgánica, el espesor de la zona aeróbica alcanzará un valor único. Un aumento en la carga orgánica del agua residual reducirá el espesor de esta zona, mientras un aumento en la velocidad de flujo aumentará el espesor de la zona aeróbica.

La profundidad a que penetra el sustrato en el film, depende de:

- El caudal del agua residual
- La carga orgánica del agua residual
- El coeficiente de difusividad del sustrato molecular por la biomasa
- La velocidad de utilización del sustrato por la biomasa

En general, la velocidad de penetración aumentará con el aumento de la carga orgánica del agua residual y la velocidad del flujo.

Cuando el sustrato es utilizado por los microorganismos, el espesor del film microbiano aumenta. Entonces los microorganismos que existen en la zona de inanición deben utilizar su propio material citoplasmático para mantener y desarrollar las funciones vitales (por ejemplo, el crecimiento de la fase endógena). En ésta fase, el soporte material pierde la facilidad de limpieza y se desprende, siendo llevado fuera del filtro. Esto es conocido como desnudamiento.

La materia celular sintetizada tiene una duración limitada, alcanzando finalmente la muerte y su descomposición. Al descomponerse las células muertas liberan determinados nutrientes esenciales, que pueden ser reutilizados en la síntesis de nuevo material celular.

La distribución vertical de las especies está muy influenciada por la carga de las aguas residuales a tratar, por los cambios estacionales, espesor de la película biológica y cambios de temperatura.

Como resumen señalar que las especies más frecuentes encontradas en todo el lecho biológico, lo mismo que en los lodos activados, son los rizópodos, flagelados y ciliados.

## 1.28. Tiempo de permanencia

Para asegurar una buena transferencia de la materia orgánica del agua residual a la película biológica, hace falta un tiempo de permanencia adecuado, el cual depende de la carga hidráulica, por lo que el porcentaje de la eliminación de la materia orgánica está en íntima relación con aquella. Si es muy alta, con tiempos de permanencia bajos, sólo se podrán eliminar los sólidos en suspensión y los coloidales y muy poco la soluble, mientras que con cargas bajas, el tiempo de permanencia puede ser el adecuado para estabilizar la materia orgánica soluble y eliminar más fácilmente la biodegradable. En todo caso, la eliminación de la materia orgánica que pasa a través del lecho, dependerá de la naturaleza del agua a tratar, de las características del reactor, del material de relleno, de la temperatura ambiente, etc. En general, el tiempo que debe tardar el agua residual a depurar, en atravesar el relleno, es de 20 a 60 minutos.

Este tiempo de permanencia se puede calcular mediante la ecuación:

$$t/H = (c \cdot S_e^m)/Q^n \quad (37)$$

Siendo

t = tiempo de permanencia

H = altura del lecho

Q = carga hidráulica

$S_e$  = superficie específica del material

c, m y n = constantes que dependen del material de relleno

La superficie del film utilizada es proporcional a  $S_e$ .

## 1.29. Recirculación

El rendimiento de los lechos biológicos puede incrementarse recirculando el agua residual a depurar. La recirculación consiste en hacer pasar a través del reactor parte del efluente ya depurado, desde el sedimentador secundario, mezclando esta agua con el agua residual que alimenta el sistema, a fin de que se ponga en contacto con el lecho biológico más de una vez. Esta recirculación del efluente aumenta, como es lógico, el tiempo de contacto con el film biológico, diluye la concentración de la materia orgánica en el agua que riega el lecho y ayuda a esparcir los microorganismos por las zonas más bajas del mismo. Por otra parte, proporciona una carga hidráulica más uniforme a lo largo de las 24 horas del día y un efecto mayor de remojada del medio. Al aumentar con la recirculación, el caudal por unidad de superficie (carga hidráulica), se produce una mayor velocidad de paso, la cual provocará un lavado mayor de la biopelícula, evitar así la posibilidad de estancamientos y la disminución de la ventilación por obturación de las oquedades.

Esta mayor carga hidráulica reduce también la probabilidad que se críen babosas y moscas.

Por otra parte, se ha observado que el espesor de la película orgánica es directamente proporcional a la carga orgánica de las aguas residuales (a mayor carga orgánica, mayor espesor de la película biológica). Mediante la recirculación puede diluirse la concentración de las aguas residuales que entran en el reactor, evitando así un crecimiento excesivo del film biológico.

La recirculación puede ser: continua o intermitente, a caudal constante o variable. Puede realizarse sólo durante periodo de caudal bajo, para mantener en movimiento los distribuidores giratorios, para evitar que se reseque la película del medio o para evitar la congelación. La recirculación proporcional al caudal de llegada, puede utilizarse para reducir la concentración de las aguas que se vierten sobre el lecho, mientras que la recirculación continua y constante, mantiene a los distribuidores en funcionamiento y tiene a regular las puntas y lo mínimos de carga orgánica, aunque supone un mayor coste de bombeo.

Por lo señalado anteriormente se comprende que la recirculación de una parte del efluente, ya que al decantador primario o directamente al lecho, es un método útil para mejorar el rendimiento del proceso.

En resumen, la recirculación tiene los objetivos siguientes:

1. Efectúa una dilución del efluente, reduciendo el efecto que puede producirse de una sobrecarga instantánea.
2. Reduce la velocidad de crecimiento de la película biológica por efecto de la dilución y del aumento de la carga hidráulica.
3. Ejerce un mayor arrastre de las partes no activas de la película biológica, procurando un contacto más efectivo de ésta con el agua residual a depurar, procediendo a una autolimpieza del film.
4. Tiende a realizar una distribución vertical más uniforme de los microorganismos que forman el film, sembrando las aguas a depurar.
5. Se produce un aumento del rendimiento, como consecuencia del hecho de que el agua a tratar ya no pasa solamente una vez por el sistema, sino que, dependiendo del porcentaje de recirculación, hay una cierta parte de aquella que pasa una vez, otra que pasa dos veces, otra tres, etc.

Evidentemente la recirculación es más cara porque supone bombear un volumen importante de efluente, ya que el porcentaje de recirculación, medido siempre en base al caudal del agua residual, suele variar de 0.5 a 0.3.

Hay que tener en cuenta que la recirculación es el único medio de que dispone el operador de un lecho biológico para variar las condiciones del proceso. Muy poco frente a la elasticidad que supone el control del funcionamiento de unos lodos activados.

El factor de recirculación se calcula mediante la fórmula:

$$F = (1+R) / [1+(R/100)]^2 \quad (38)$$

Siendo:

$$R = Q_r/q$$

Donde:

$Q_r$  =caudal recirculado

$Q$  = caudal a depurar

## 1.30. Rendimiento

Como ya se ha señalado, para lograr el máximo rendimiento, el crecimiento biológico sobre el medio debe mantenerse totalmente aerobio.

Un lecho biológico bien diseñado y operado, no sobrecargado, es capaz de reducir la materia orgánica, expresada en  $DBO_5$  del orden del 90% aunque en realidad el rendimiento en función inversa de la carga aplicada, y por lo tanto, los lechos de alta carga producen rendimientos menores, a menos que se incremente la recirculación. Los efluentes que producen los lechos biológicos suelen ser más claros que los procedentes de los lodos activados y presenten una mayor nitrificación.

## 1.31. Diseño

Para el cálculo de los lechos biológicos se suele partir de parámetros experimentales. Hay diversas fórmulas teóricas en la bibliografía científica que ayudan al cálculo de los distintos parámetros necesarios para su diseño, aunque al ser éste empírico, será el operador, en definitiva, el responsable de su buen funcionamiento.

La carga hidráulica, como ya se ha citado, regula el lavado del lecho y la carga orgánica la capacidad de degradación de la materia orgánica. La necesidad de un determinado nivel de lavado se obtiene o aumentando la profundidad del lecho biológico o recirculando.

Los datos básicos que se deben conocer, para realizar el diseño de un lecho biológico son:

- Número de habitantes de la población
- Caudal unitario en litros /persona · día
- Caudal total ( $m^3$ /día)
- Carga unitaria ( $DBO_5$ /persona · día)
- Concentración de AR a depurar en  $mg\ DBO_5$ /litro
- % de reducción de la  $DBO_5$  que se desea
- Carga orgánica o volúmica en  $kg\ DBO_5/m^3 \cdot día$
- Carga hidráulica en  $m^3/m^2 \cdot día$
- Caudal de diseño ( $m^3$ /hora)

## 1.32. Control

En la depuración de las aguas residuales, el lecho biológico se ubica, generalmente, entre un sedimentador primario y otro secundario. La calidad del efluente vendrá afectada por la eficiencia del sedimentador secundario.

Como ya se ha indicado, éste sistema de depuración es muy rígido, dependiendo su correcto funcionamiento del diseño (que en todo caso es siempre empírico), del material de relleno y de la condiciones externas, pudiendo únicamente controlar las condiciones externas así como la recirculación.



El manejo del sistema no es complicado, siendo muy limitado el número de opciones ante un problema determinado. Lo mejor para minimizar los problemas que pueden plantearse en la correcta operación de un lecho biológico es asegurar un buen mantenimiento. La mayoría de los problemas surgen del descuido del operador y de la presencia de residuos debidos a una sobrecarga, la cual es preciso prevenir.

De todas maneras, los controles de análisis en el laboratorio indicarán el correcto funcionamiento de lecho.

Se deberán realizar los análisis correspondientes, y comprobar si éstos resultados están dentro de las variaciones normales que se pueden presentar en un lecho biológico, o muy próximas a ellas. Caso contrario, puede haber problemas de funcionamiento.

La frecuencia de cada análisis y las oscilaciones en los resultados, pueden alterarse al variar la concentración de las aguas residuales, su frescor, las características del abastecimiento de agua, las condiciones meteorológicas y los vertidos industriales.

### *1.32.1. Pruebas a realizar y problemas que pueden presentarse*

Problemas que pueden presentarse:

- Sólidos en suspensión. Un efluente con muchos sólidos en suspensión será difícil de tratar debido a alguno de los factores siguientes.
  - (1)Grandes arrastres de lodos en los lechos
  - (2)Alta carga hidráulica
  - (3)Carga de choque por residuos tóxicos o por sobrecargas orgánicas
  - (4)os grandes incrementos en los sólidos en suspensión pueden ser debidos a cambios estacionales, a periodos de alta carga orgánica aportada por las aguas residuales, a medidas correctoras para evitar el estancamiento, etc.
- Estancamiento. El estancamiento es el resultado de una excesiva carga orgánica, sin el correspondiente aumento del caudal de recirculación. También puede ser debido al uso de material de relleno demasiado pequeño para el medio, o material heterogéneo. Los trozos pequeños de relleno se introducen entre los más grandes, facilitando el taponamiento del lecho por los fangos. En este caso conviene sustituir el medio.
  - (1)Desarrollo excesivo de larvas o babosas que pueden taponar los espacios libres.

Estos problemas se pueden resolver aumentando la carga hidráulica, incrementando la recirculación o ajustando los orificios del brazo distribuidor para que al agua riegue el lecho con uniformidad y puede arrastrar alguna de las partes más pesadas de la película biológica.

Otras formas de eliminar los estancamientos son:

- (a)Regar con agua sobre la zona estancada, lo que produce el lavado del fango bacteriano

- (b) Remover manualmente la superficie del lecho, retirando las hojas u otros residuos.
- (c) Dosificar con 5 mg/L de cloro, durante varias horas. Si el caudal es pequeño, se utiliza la cantidad de cloro mínima, suficiente para mantener 0,5 mg/L de cloro residual.
- (d) Inundar el lecho, permaneciendo 24 horas sumergido. El crecimiento se hace anaerobio y la película se ablanda y desprende.

- Olores. La aparición de malos olores indica que predominan las condiciones anaerobias en las capas inmediatas a la superficie del lecho. Para evitar estos malos olores es necesario mantener condiciones aerobias dentro del colector y en el tratamiento primario y comprobar la ventilación del lecho
- Moscas. El insecto más molesto que se presenta en los lechos biológicos es una mosca (psychoda) que plantea problemas al personal de la planta y a los vecinos próximos. Aparecen con más frecuencia en los lechos de baja carga.

Se pueden controlar utilizando alguno de los métodos siguientes:

Aumento de la recirculación. Una carga hidráulica continua de  $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$  mantendrá limpio el lecho de larvas y moscas.

Aplicando en las paredes del reactor insecticidas autorizados

Aplicando semanalmente una dosis reducida de cloro para obtener 0.5 mg/l de cloro residual

Con un buen mantenimiento del césped y buena limpieza, se disminuye el problema de las moscas.

- Problemas climáticos. Cuando las temperaturas son frías, las aguas residuales pulverizadas por las toberas del distribuidor o las capas de agua, finas, formadas sobre el lecho, pueden congelarse y acumular hielo que puede producir daño en la estructura.

Se puede eliminar o disminuir el problema adoptando las medidas siguientes:

Disminuir la recirculación hasta el caudal mínimo necesario para mantener el adecuado funcionamiento del lecho

Ajustar los orificios para reducir la pulverización

Romper y separar las placas de hielo más gruesas

Abrir parcialmente las compuertas de los extremos de los brazos para que fluya una corriente, en vez de una pulverización, a lo largo de las paredes

- Alta carga hidráulica. La alta carga hidráulica arrastrará los sólidos ligeros, los cuales saldrán a través de los vertederos. Si la instalación no recibe un caudal mayor que su capacidad nominal, se puede ajustar el caudal de recirculación.
- Carga de choque por residuos tóxicos o por sobrecargas orgánicas o hidráulicas

La llegada al sistema de depuración de residuos tóxicos para los organismos en concentraciones nocivas, produce una carga de choque y da lugar a malos olores o al arrastre de la película del film.

- Seguridad en las instalaciones. Además de las normas a seguir que dicten la experiencia, se deben tener en cuenta las siguientes:
  - (1) Cuando sea necesario inspeccionar o revisar el distribuidor rotativo, se corta la corriente de agua residual al equipo y se para éste.
  - (2) Nunca se debe pasar o permanecer en el medio mientras está funcionando el distribuidor rotativo.
  - (3) Para llegar a la superficie del medio, se coloca una escalera.
  - (4) Al pasar por el medio filtrante, deben extremarse las precauciones, ya que los lodos lo hacen muy resbaladizo.
  - (5) No debe permitirse jamás que nadie se monte en un distribuidor rotativo.

# **CAPÍTULO 5: DEPURACIÓN POR BIODISCOS**

Los biodiscos, también llamados contactores biológicos rotativos, constituyen un sistema de depuración biológica, que fue instalado industrialmente, por primera vez, en Alemania Federal en 1960.

Constan de un depósito semicilíndrico (reactor), en cuyo interior se han dispuesto, enfilados mediante un eje horizontal, una serie de discos que giran lentamente dentro del depósito, el cual contiene agua residual a depurar. Los discos constituyen el soporte inerte sobre cuya superficie se forma un film biológico.

Los discos se sitúan muy próximos unos a otros y a la pared del depósito por el que circula el agua residual. Esto hace, que al girar los mismos, provoquen una agitación del agua residual contenida en el depósito, agitación que, por supuesto, dependerá de la velocidad de rotación de los discos. De aquí que la característica más importante de los biodiscos sea el movimiento de los discos, los cuales son el soporte inerte de la masa biológica activa.

Para aumentar la eficacia de las pequeñas plantas, de una o dos unidades de biodiscos, el depósito o reactor biológico se divide en compartimentos o etapas, separadas por medio de tabiques móviles situados en el depósito, a fin de variar el volumen de cada etapa, según las necesidades.

Un sistema de biodiscos suele estar formado por una serie de módulos o biodiscos, cada uno de los cuales constituye una etapa en la depuración de las aguas residuales, aportando la superficie necesaria para que pueda adherirse la biomasa. A la disposición de las diversas etapas, en un sistema de biodiscos, se le denomina "escalonamiento" de los biodiscos.

Los discos, en su movimiento, se encuentran alternativa y sucesivamente en contacto con el agua residual (inmersión) y con el oxígeno del aire (emersión). Sumergida aproximadamente el 40% del área de los discos en el depósito por el que circula el agua residual, gira lentamente de 1 a 2 revoluciones por minuto, poniendo el disco, alternativamente, en contacto con el agua residual y con el oxígeno del aire. Los microorganismos, presentes de una manera natural en el agua residual a depurar, se adhieren a la superficie del disco, formando una capa de limo que recibe el nombre de biomasa, biopelícula o biocrecimiento. Esta población biológica que se acumula en los discos, se alimenta de la materia orgánica que lleva el agua residual, biodegradándola. En efecto, cuando al agua residual escurre por el disco, forma una película líquida que será atravesada por el oxígeno del aire y por el anhídrido carbónico formado en la biomasa. El sustrato y los productos no volátiles se intercambiarán entre la biomasa y la película líquida. Esta, en su crecimiento, llega un momento en que se ejercen, sobre la biopelícula, fuerzas de cizalla, provocadas por el paso del agua residual y por el giro del eje, provocando el desprendimiento de biomasa que pasa al medio líquido a depurar. Estas fuerzas de cizalla ayudan al buen funcionamiento de los biodiscos, ya que las mismas evitan el crecimiento excesivo de la biopelícula, eliminando continuamente el "exceso" de biomasa que crece en el disco. La biomasa desprendida permanece en suspensión en el agua residual a depurar, como consecuencia de la agitación producida por el movimiento de los discos, lo que ayuda a mantener un crecimiento uniforme de la población activa de los microorganismos. Esta acción de crecimiento y desprendimiento de la biomasa se repite continuamente, siendo llevada la biomasa desprendida, junto con los sólidos en suspensión inertes, al sedimentador secundario, para ser separados del agua residual depurada antes de verterla al cauce receptor.

En la emersión, en la parte del disco que está en contacto con el aire, el oxígeno del mismo se disuelve en el agua residual que está adherida a la biomasa superficial, siendo la cantidad de oxígeno que se disuelve directamente proporcional a la velocidad de rotación. De aquí que al aumentar la velocidad de rotación se puedan utilizar los biodiscos como aireadores, ya que al dar a los discos una rotación muy rápida se mantiene muy delgada la capa de biomasa, jugando entonces los discos, esencialmente, el papel de suministradores de oxígeno a la masa biológica que se encuentra en suspensión.

### 1.33. Funcionamiento

El mecanismo de funcionamiento de los biodiscos es muy complejo, siendo los fenómenos que se producen, cuando la biopelícula fija en el disco se pone en contacto con el agua residual que contiene el oxígeno y el sustrato, los siguientes:

- 1ª etapa: transporte del sustrato y del oxígeno del agua residual a la superficie de la biopelícula
- 2ª etapa: transporte del sustrato y del oxígeno a través de la biopelícula por difusión
- 3ª etapa: oxidación del sustrato en el interior de la biopelícula

- 4ª etapa: eliminación de los productos de desecho producidos en la tercera etapa, por difusión, vertiéndolos al agua residual que se encuentra en el depósito.

Las poblaciones biológicas que se desarrollan en cualquier etapa de un biodisco reflejan las condiciones ambientales y de carga de esa etapa, siendo mayor el crecimiento de la biopelícula en las primeras etapas.

En la depuración de las aguas residuales con materia orgánica biodegradable, por medio de un sistema de biodiscos, se deben cumplir como imprescindible, las condiciones siguientes:

- Las sustancias contaminantes deben ser biodegradables
- La relación  $DBO_5:N:P$  debe tener un valor semejante a 100:5:1
- Los microorganismos que intervienen en el proceso no deben estar expuestos, por periodos de tiempos largos, a tóxicos o sustancias químicas inhibitoras que impidan el crecimiento de la biomasa.
- La temperatura de las aguas residuales debe mantenerse en el intervalo de 7 a 38 °C.
- El pH debe mantenerse en el intervalo de 5 a 9.
- Cuando se pretende la nitrificación, la relación alcalinidad  $CaCO_3:NH_3$  en N debe ser 7:1.
- El sistema de biodiscos debe estar precedido de un pretratamiento un tratamiento primario.
- Al final del sistema de biodiscos se debe instalar un decantador secundario, ya que estas plantas se suelen producir lodos, con una media anual de 400 a 500 g/kg de  $DBO_5$  eliminados, llegando a un máximo de 2000 a 3000. El peso máximo de lodos se produce en tiempo frío y cuando las aguas residuales a depurar llevan cantidades notables de sólidos en suspensión.

## 1.34. Aplicaciones

Las aplicaciones se pueden clasificar como desbaste (eliminación del 50% o más de la  $DBO$ ), depuración secundaria (eliminación del 85% de la  $DBO$ ), depuración secundaria y nitrificación combinada, o nitrificación de un caudal previamente tratado.

Si se ha diseñado adecuadamente, un sistema de biodiscos puede dedicar la primera etapa al desbaste o tratamiento primario, las dos o tres etapas siguientes al tratamiento secundario y las restantes etapas, cuyo número dependerá de las metas propuestas en la depuración, a la nitrificación.

## 1.35. Clasificación

Los biodiscos se pueden clasificar teniendo en cuenta:

- La densidad del medio de que están contruidos los discos
- Por la forma en que se ejerce la propulsión
- Por su método de operación
- Por su disposición
- Por su aplicación

En relación con el medio de soporte, éste se clasifica en medio de baja densidad, de densidad media o de alta densidad.

En relación con la forma de propulsión, la que más se usa es la del tipo mecánico, pudiendo en algunos casos encontrarse biodiscos que tienen una propulsión por aire.

En relación con su método de operación, existen diferentes medios. Los biodiscos puramente mecánicos dependen solamente del contacto con la atmósfera de la rotación para la transferencia de oxígeno, y del cizallamiento de la biopelícula para el control del grosor. Los sistemas de biodiscos "aéreos" y los que, aun movidos mecánicamente, poseen una aireación suplementaria, usan aire difundido. A veces se encuentran sistemas híbridos que constan de una propulsión mecánica con aporte de aire intermitente, usándose el aire difundido para aumentar el cizallamiento de la biopelícula y para reducir el peso de los discos.

En relación con la disposición de las unidades de biodiscos dentro del sistema, se pueden montar en paralelo o perpendicularmente al caudal, rotando a favor o en contra del caudal y con tres mono o multietapa.

## 1.36. Factores que influyen en el proceso

### *1.36.1. Línea del oxígeno*

Uno de los factores principales que influyen en el proceso es la disponibilidad de oxígeno y de su transferencia, la cual controla la biodegradación de la materia orgánica.

El oxígeno, en primer lugar, se disuelve por contacto directo entre la atmósfera y la zona de biopelícula expuesta a al aire. Posteriormente se produce una transferencia de oxígeno en el seno del agua residual, como consecuencia de la turbulencia generada por el agua, por la rotación de los discos, aunque la fuente mayor de oxígeno es necesario para que se realice el proceso, procede de la transferencia directa del oxígeno del aire a la biopelícula y al agua residual fija en la misma. Debido a los complicados fenómenos de transferencia de oxígeno y su difusión, es muy difícil estudiar esta transferencia por modelos matemáticos

simples. Por esto es por lo que, para el diseño de los biodiscos se usan métodos empíricos.

La presencia de cargas orgánicas o hidráulicas altas, pueden provocar bajas concentraciones de oxígeno disuelto, debido a que provocan un incremento de las cargas en el reactor, y por tanto, aumenta la demanda de oxígeno o disminuye el periodo de permanencia del agua en el sistema.

La concentración de oxígeno en el agua residual, a lo largo de un sistema de biodiscos, variará de una etapa a la siguiente, debido a la diferente demanda de oxígeno de la materia orgánica en el agua residual, según sea el grado de depuración en que se encuentre, pudiéndose utilizar éste parámetro para determinar la eficiencia de una planta de depuración de agua por éste sistema. En el caso de un sistema de biodiscos diseñado para la eliminación de la materia orgánica y de los sólidos en suspensión, las concentraciones de oxígeno serán muy bajas, del orden de 0.5 a 1.0 mg/l en la mayoría de las etapas. Sin embargo, si se ha diseñado para eliminar compuestos nitrogenados, la última etapa tendrá concentraciones de oxígeno altas, de 4 a 8 mg/l.

El conocimiento de la concentración del oxígeno disuelto a lo largo del sistema, permitirá conocer lo que está ocurriendo en las diferentes etapas. Cargas orgánicas altas producirán niveles bajos e incluso ausencia de oxígeno disuelto.

Parece que la transferencia máxima de oxígeno es de  $7.3 \text{ g/día} \cdot \text{m}^2$

### *1.36.2. Carga orgánica*

Se denomina carga orgánica a "la materia orgánica presente en un agua residual, medida como  $\text{DBO}_5$  soluble".

Tanto la carga orgánica alta, como la baja, pueden influir en el correcto funcionamiento de un sistema de biodiscos.

La sobrecarga puede llegar a producir malos olores, la ralentización del proceso, e incluso averías en los equipos.

Los problemas de sobrecarga se pueden corregir prolongando la primera etapa mediante un ajuste de las siguientes, así como mediante una alimentación múltiple. Otra forma de corregirla es por una aireación suplementaria, que provocará una disminución de la sobrecarga como consecuencia de mantener fresca la biomasa, mejorando la biodegradación de la materia orgánica contaminante. Ahora bien, si la sobrecarga es constante, no existe otra solución que aumentar al área superficial, a fin de disminuir la carga por unidad de superficie.

La carga baja, sobre todo en el caso de que haya mayor área superficial en la primera etapa, puede provocar el crecimiento de biomasa indeseable en las fases finales y una pobre sedimentación secundaria, debido a un aumento del tiempo de retención. La corrección se logra eliminando la línea secundaria. Otra alternativa es recircular el efluente secundario a lo largo de la planta.

La carga orgánica media, como la  $\text{DBO}_5$  soluble, se suele limitar a  $15\text{-}25 \text{ g/m}^2 \cdot \text{día}$  en la primera etapa y a  $30\text{-}30 \text{ g/m}^2 \cdot \text{día}$  en la segunda etapa.

### *1.36.3. Carga hidráulica*



Se denomina carga hidráulica "al caudal de agua residual a depurar, expresado en litros por metro cuadrado y día ( $L/m^2 \cdot \text{día}$ )". El caudal que llega a un sistema de biodiscos afecta a la carga hidráulica y a la orgánica, y por tanto, al tiempo de retención del agua residual en el sistema. Aumentando el caudal se aumenta la carga hidráulica y la orgánica, disminuyendo el tiempo de retención, siendo éste directamente proporcional al volumen de líquido disponible dentro del depósito del biodisco, y del caudal del agua residual.

Los cambios de caudal del agua residual o su concentración, se deben evitar mediante el ajuste de los caudales o su escalonamiento.

Las cargas hidráulicas de diseño, para aguas residuales urbanas, van de 40 a  $300 l/m^2 \cdot \text{día}$ .

La carga hidráulica para una óptima biodegradación de la materia orgánica, se encuentra en un rango de 60 a  $250 l/m^2 \cdot \text{día}$ , mientras que para la nitrificación van de 40 a  $75 L/m^2 \cdot \text{día}$ .

## 1.37. Biopelícula

La biopelícula está constituida por células apiladas irregularmente, las cuales presentan canalículos por donde puede realizarse el cambio de masa. Con el transporte del sustrato es alrededor de 3 a 5 veces más lento que el del oxígeno, se pueden llegar a formar, dependiendo de varios factores, hasta tres capas en la biopelícula.

Estas tres capas son:

- Una capa externa aerobia, en crecimiento, la cual recibe el sustrato.
- Una capa aerobia que no recibe sustrato. Esta capa no está en crecimiento, pero tiene una respiración endógena.
- Una capa anaerobia, la más interior, que no recibe ni oxígeno ni sustrato.

Esta última capa tiene un color negro característico y es muy frágil, a causa de las burbujas de anhídrido carbónico que se forman. Estas burbujas, con las fuerzas de cizalla, contribuyen a la que desprege la biopelícula, siendo arrastrados los lodos por el flujo del líquido. El soporte así desnudado es colonizado de nuevo. Este fenómeno por el cual el espesor de la biopelícula se regula de forma automática, es llamado autolimpieza.

Las biopelículas, fijadas en los discos, son el soporte donde se realizan los complejos fenómenos físicos, químicos y biológicos de la depuración, cuya descripción en detalle es imposible. No obstante, la experiencia ha permitido elaborar varias hipótesis, las cuales constituyen la base de los modelos relativos al agotamiento de los sustratos, pudiendo distinguirse las acciones siguientes, realizadas en la diversas etapas que se encuentran en la evolución de los sustratos, entre las fases líquida y sólida. Estas acciones son:

- Transporte de los sustratos por difusión, en la película del agua residual que escurre.
- Transporte de los sustratos por difusión, en la biopelícula.

- Reacciones químicas realizadas en la interfase entre la película líquida y la biopelícula, o en ésta última.

Algunos investigadores indican que la biopelícula está estratificada en dos zonas: una anaerobia y la aerobia. Para que esta estratificación aparezca cuando es el oxígeno disuelto el único elemento limitante del crecimiento de la biopelícula, pudiendo considerarse en este caso "un espesor activo".

Por otra parte, en el curso del crecimiento de la biopelícula, existe una etapa, fase estacionaria, durante la cual la velocidad de crecimiento de las bacterias aerobias es nula.

Como regla general se observa que son la materia orgánica y el oxígeno, los elementos considerados como limitantes de la velocidad de crecimiento de los microorganismos.

### *1.37.1. Espesor de la biopelícula*

Se estima que el espesor de la biopelícula activa varía de aproximadamente 0.1 mm, en concentraciones bajas de sustrato, a 1.5 mm a alta concentración de sustrato. En la práctica, su espesor se mantiene prácticamente constante en cada etapa, con un valor que es función de la  $DBO_5$  del agua a depurar. Es efecto, para unas concentraciones de aireación dadas, y para las concentraciones de oxígeno encontradas habitualmente en los biodiscos en régimen permanente (1 a 5 mg/l), el espesor activo de la biopelícula permanece constante y es del orden de 3 mm.

Varios autores han estudiado las relaciones que puedan existir entre el espesor de la biopelícula y su capacidad de depuración. Desde este punto de vista, se adopta la noción de "espesor crítico" en relación con la profundidad de la biopelícula que es "la profundidad a la cual el oxígeno se transforma en elemento limitante".

Parece, por otra parte, que se han establecido correlaciones entre la velocidad a que se agota el sustrato y el espesor de la biopelícula, habiendo encontrado que más allá de un espesor crítico, correspondiente al espesor activo de la biopelícula, la velocidad de utilización del sustrato es constante y por tanto independiente del espesor de la misma.

### *1.37.2. Densidad*

En biopelículas completamente aerobias se ha encontrado que la densidad media, en peso seco de sólidos, es de  $0.1 \text{ g/m}^3$ . Esta densidad decrece hasta  $150 \text{ } \mu\text{g/cm}^3$  a causa de la producción de gas y lisis de las células en la capa aeróbica más profunda.

### *1.37.3. Composición*

No es posible encontrar una descripción bibliográfica completa de todos los microorganismos que actúan en los procesos biológicos que se realizan en los distintos procesos de depuración de las aguas residuales con materias orgánicas biodegradables, debido a que, la depuración biológica es una operación en la que participa una población compleja de microorganismos que utilizan diversas sustancias polucionantes, disueltas o en suspensión, como fuente de carbono y

energía. Por otra parte, la población de microorganismos depende de la carga contaminante y la clase y categoría de estos contaminantes.

En los biodiscos, esta población depende de la etapa que se considere, ya que en los mismos hay una selección biológica por niveles. En general, la biomasa está compuesta por los mismos microorganismos que los flóculos de los lodos activados, esto es, una biocenosis bacteriana con predadores.

Se puede indicar que los microorganismos que se fijan a los discos, que son los mayores responsables de la eliminación de los contaminantes biodegradables presentes en las aguas residuales, son los filamentosos y las bacterias heterótrofas no filamentosas, cambiando las especies bacterianas, que se encuentran fijadas a los discos, a medida que se desarrollan las distintas etapas de la depuración: las bacterias que utilizan los compuestos de carbono, se fijan predominantemente a los discos que se encuentran en las etapas iniciales, donde la concentración de estos materiales es relativamente alta. Las bacterias nitrificantes (nitrosomas y nitrobacter) se encuentran, fundamentalmente, fijadas a los biodiscos situados en las últimas etapas de la depuración, donde la concentración de materiales carbonados es mucho menor, encontrándose a un nivel tal que los organismos nitrificantes pueden competir por el espacio en la superficie del disco, ya que al no reproducirse tan rápidamente como los carbonáceos, no se suelen establecer en poblaciones suficientemente grandes para producir la nitrificación hasta que la concentración de  $\text{DBO}_5$  no está por debajo de 30 mg/l o tenga la misma concentración que el amonio.

Hay que tener en cuenta que el proceso de nitrificación es un consumidor de alcalinidad. Al reducirse ésta, disminuye por tanto el pH del agua, inhibiendo a los organismos nitrificantes. En este caso se deben añadir cal, hidróxido sódico o carbonato sódico si se desea que la nitrificación se produzca adecuadamente.

Los gusanos juegan un papel particular, contribuyendo, con el anhídrido carbónico formado, a despegar la biopelícula mediante la formación de galerías, provocando la autolimpieza del disco.

Hay un hecho a resaltar, al estudiar la biopelícula, y es la repartición radial cuantitativa de la biomasa, siendo menos abundante en las zonas más próximas al eje, como consecuencia del menor tiempo en que está sumergida la superficie.

Como es lógico, la salud de la flora microbiana adherida al disco, será un reflejo de la calidad de la depuración de las aguas residuales que se pretenden tratar. Esta flora microbiana puede ser alterada o modificada por múltiples causas, como son el cambio de las sustancias contaminantes, el cambio de los parámetros hidrológicos y físico-químicos, etc.

Las condiciones anaerobias, disminución e incluso desaparición del oxígeno disuelto, son responsables del crecimiento de microorganismos parásitos, por ejemplo, un microorganismo sulfito oxidante, filamentosos y microaerobio, del género *Beggiatoa*, que coloniza competitivamente la superficie de los discos. Esto lleva a una disminución de la biodegradación, ya que aquellos tienen unos metabolismos más bajos. Gracias a que el género *Beggiatoa* es microaerófilo, puede sobrevivir en condiciones de bajo contenido de oxígeno disuelto.

Las poblaciones de crecimiento lento de *Beggiatoa*, cuando predominan en los biodiscos, tienen una apariencia blanda de color blanco, siendo el olor de la película séptico y desagradable, marcadamente diferente del olor musgoso de un cultivo sano.

Un posible desarrollo de la biopelícula sobre los discos, con aguas residuales urbanas, sería, según la bibliografía científica, el siguiente: la colonización comenzará con el desarrollo de una primera capa sobre la superficie limpia del disco, la cual está integrada por bacterias filamentosas pertenecientes a los géneros *Sphaerotilus* y *Thiotrix*, que formarán la base donde más tarde se adherirán otros organismos, entre ellos, protozoos, nematodos y rotíferos.

La colonización de los protozoos se produce en tres fases sucesivas: en la primera se observa en el sobrenadante un predominio de las amebas y flagelados. En la segunda fase, descienden en el sobrenadante las poblaciones de flagelados y amebas al comenzar éstas a adherirse a la película formada por las bacterias en los discos; es éstos, además, comienzan a aparecer ciliados libres nadadores y ciliados sésiles (con pedúnculo). En este momento, la película que tapiza los discos ya ha alcanzado un grosor suficiente como para desprenderse parte de la biomasa, lo que provoca fluctuaciones en el número de ciliados, amebas y flagelados en el sobrenadante de los depósitos. Por último, en la tercera fase, se observa un dominio de los ciliados pedunculados en los discos y en el sobrenadante un dominio de ciliados libres nadadores. La colonización de nematodos y rotíferos tiene lugar al mismo tiempo que la de los protozoos, desapareciendo del sobrenadante al final de la colonización y apareciendo abundantemente en los discos.

## 1.38. Diseño

El diseño de un sistema de biodiscos se basa, normalmente, en curvas empíricas de carga. Varios son los modelos propuestos, el de Schulze (1960) o modelo semilogarítmico, el empírico de Pöpel (1964), el llamado de orden 1 de Kornegay & Andrews (1972), el cinético de Hansford (1978), el de Wu y Smith (1982), de Surampelli y Bauman (1986), el modelo biocinético de Spengel y Drombak (1992).

El diseño debe ir dirigido a incrementar el área de los discos y los ajustes en el conjunto de la planta, manifestados por la regulación de los caudales y cargas orgánicas punta, automatización y ajuste del pH y de la alcalinidad, establecimiento de módulos o etapas para minimizar las variaciones estacionales de la carga y de los cambios de temperatura.

Igualmente, las características a tener en cuenta en su diseño con la configuración de los discos, la forma en que se unen los discos al eje, el área activa de los discos en relación con la longitud de eje y el modo de rotación del mismo.

El número de módulos o etapas a tener en cuenta en el diseño de un sistema de biodiscos, depende: de las características del efluente, de los criterios que se adopten para la carga orgánica e hidráulica en la primera etapa y en la totalidad del proceso, de la composición de las aguas residuales y de su temperatura. Si se desea una reducción del 85 al 90 % de la DBO<sub>5</sub> e incluso la nitrificación, se suelen recomendar cuatro o más etapas.

Para lograr la nitrificación, los factores de diseño que se tienen que tener en cuenta son:

- La concentración de la DBO<sub>5</sub> del afluente

- La concentración de nitrógeno amoniacal del influente
- La temperatura del agua residual
- La concentración de oxígeno disuelto en las aguas residuales
- El pH
- La alcalinidad
- El caudal de entrada
- La variabilidad de la carga orgánica e hidráulica

El diseño, para lograr una buena nitrificación, no se debe basar únicamente en la concentración del nitrógeno amoniacal del influente, porque, como ya se ha señalado en otro apartado, en las aguas residuales se encuentran compuestos que contienen nitrógeno orgánico, que se hidrolizarán, liberando nitrógeno amoniacal cuando el agua residual pasa a través del sistema de tratamiento.

Mientras que la nitrificación aparece en las últimas etapas de los biodiscos cuando las concentraciones de  $\text{DBO}_5$  están próximas a 30 mg/l, los valores mayores de nitrificación no se logran hasta que la  $\text{DBO}_5$  no desciende hasta 15 mg/l o menos. Un valor máximo de nitrificación de 1.5g/m<sub>2</sub> es aparentemente el resultado de las limitaciones en la transferencia de oxígeno.

### *1.38.1. Equipamiento*

Siendo invariables el fundamento científico de la depuración por biodiscos, para alcanzar un óptimo funcionamiento, los biodiscos diferirán en cada componente usado para su construcción, incluyendo ejes, características de los materiales con que se construyen los discos, rodamientos, partes motoras, etc.

- a) Ejes: el eje hace de soporte de los discos. En los biodiscos accionados mecánicamente, el eje es el que los hace girar. El de los accionados por aire, el eje soporta al disco, pero es el disco el que, gracias al aire insuflado sobre las cazoletas, el que hace girar el eje.

La longitud máxima de los ejes suele ser de unos 8 metros, de los cuales 7.5 están soportando los discos.

La forma suele ser muy variada (cuadrada, redonda, octogonal, etc.) dependiendo del método que se use para fijar los discos. El grosor depende de las necesidades estructurales.

La elección del tipo de eje se hace considerando: la carga, las necesidades del proceso, el rendimiento y las preferencias estructurales, dependiendo del disco y del anclaje de éste al eje.

La longitud del eje, el diámetro de los discos y la densidad de los mismos determinan el área del disco que puede soportar el eje, seleccionándolos de acuerdo con el caudal a depurar y la calidad de las aguas residuales, así como el número de etapas del sistema.

La elección de un área superficial adecuada para cada fase permitirá asegurar la óptima depuración de las aguas residuales.

- b) Materiales con que se construyen los discos: los materiales con que se construyen los discos son, entre otros, aluminio, poliestireno, polietileno, plexiglás, etc.

Se dividen en de baja densidad o estándar, de densidad media y de alta densidad, cada uno de los cuales tiene una aplicación particular. En general, los medios de baja densidad se utilizan en las etapas iniciales del sistema de biodiscos, donde las cargas, son mayores, la eliminación de la materia orgánica es máxima y la biopelícula presenta mayor grosor. En esta capa debe haber una mayor separación entre discos (unos 20 mm) lo que permite el crecimiento de una biopelícula más gruesa sin peligro de atascar los biodiscos. Usando esta disposición, los biodiscos deben ser capaces de soportar un grosor de biopelícula de por lo menos 3 mm.

Los de densidad media se deben usar en la mitad del sistema, justo cuando termina la fase de eliminación carbonácea y empieza la nitrificación.

Los medios de densidad alta se usan para cargas orgánicas bajas. Teniendo en cuenta que el crecimiento biológico va a ser menor, debido a las bajas cargas orgánicas, se puede diseñar un menor espacio entre los discos, del orden de unos 12 mm, y los espesores de biopelícula serán del orden de 2mm. Según aumenta la densidad del área superficial, disminuye su sección transversal y los espacios para aireación e iluminación.

Los materiales deben tener la posibilidad de que se puedan adoptar varias configuraciones u ondulaciones que requieren el mínimo grosor y se logren grandes áreas. Con polietileno de alta densidad se requiere solamente un grosor de 10 a 15 mm, con un eje de 8 metros de longitud, con un diámetro de discos de alrededor de 4 metros.

Las ventajas que aporta el ondulado son una mayor rigidez del disco e incremento del área superficial disponible, mayor tiempo de exposición al aire, lo que trae como consecuencia una mayor transferencia de oxígeno y un contacto más uniforme de la biopelícula con el agua residual.

- c) Unidad de tracción. Los biodiscos tienen generalmente tracción mecánica. Esta consiste en un motor, un reductor y un sistema de tracción por cadena o por correa en V.

Los motores suelen tener una potencia de 3.7 a 5.6 kw por eje y la velocidad de salida del motor se reduce aproximadamente 1.6 rpm. Los motores deben tener un recubrimiento para protegerlos del ambiente.

Las unidades de biodiscos movidas por aire constan de cazoletas unidas a un distribuidor de aire perimetral.

- d) Cubiertas. Los biodiscos deben ser dotados de cubiertas a fin de protegerlos a la acción del clima, tanto en los discos como en los equipos, disminuyendo la luz solar a fin de evitar, entre otros perjuicios, la proliferación de algas, etc. La ventilación de la nave donde están situados los biodiscos, es otro de los factores que hay que tener muy en cuenta, ya que puede ser perjudicial el ambiente para los operarios.
- e) Número de etapas o módulos. Uno de los factores más importantes del diseño, en el número de etapas (escalonamiento) necesarias en el sistema

de biodiscos. Hay que tener en cuenta, para determinar el número de etapas, lo ha dicho, de que el escalonamiento crea diferentes condiciones ambientales, en la que se desarrollan varios tipos de microorganismos. El grado de proliferación de los mismos en cada fase, depende principalmente de la concentración de carbono orgánico en el agua residual a depurar. La nitrificación suele empezar en la tercera o cuarta etapa, dependiendo de la concentración de la materia orgánica presente expresada como  $\text{DBO}_5$  o de los niveles de oxígeno disuelto.

El valor de la carga orgánica, típico para cada etapa individual, está en el intervalo de 12 a 20 g  $\text{DBO}_5 / \text{m}^2 \cdot \text{día}$ .

- f) Recirculación. El buen funcionamiento de un biodisco exige que en periodos de caudal o carga bajos, para mantener suficientes microorganismos en el medio, se realice una recirculación del agua residual como alternativa para distribuir la carga del influente en el área superficial disponible.

La recirculación se debe realizar en la puesta en marcha y cuando disminuye el caudal, por ejemplo, en instalaciones pequeñas, en donde los fines de semana tienen caudales muy próximos a cero (colegios). La falta de carga orgánica, si no hay recirculación, hace que se produzca respiración endógena, siendo algunas porciones de la biomasa digeridas por otras. Si estas condiciones persisten, se perderá mucha biomasa, siendo la que quede insuficiente para lograr la depuración deseada cuando el proceso vuelva a empezar.

Por el contrario, a pesar de que la recirculación puede añadir nueva carga a los discos, es sin embargo efectiva en el control de las sobrecargas orgánicas.

- g) Rotación de los discos. La rotación de los discos hace que se produzca la aireación de las aguas residuales a depurar, produciendo la mezcla de las mismas. La velocidad de rotación se puede expresar como velocidad angular y como velocidad lineal.

Las velocidades angulares típicas son de 1.5 a 1.6 rpm en todos los ejes, tanto para la eliminación carbonácea como para el nitrógeno. Para minimizar el consumo de energía, algunos biodiscos están provistos de motores con varias velocidades, siendo esto más común en las últimas fases.

Para producir un crecimiento homogéneo sobre la superficie del disco, se necesita una velocidad uniforme. Si el crecimiento no es uniforme, los discos se verán afectados en su giro y pueden provocar cargas angulares sobre el eje y el equipo de tracción. Una rotación en tirabuzón hace que, si no se corrige, se pare el biodisco. Una velocidad rotacional no uniforme puede dañar los discos, las unidades de tracción o provocar una rotura del eje.

Una tracción subdimensionada sufrirá los mismos problemas, con fallo del motor en los casos extremos.

La dirección del giro no tiene ninguna influencia en la eficacia del tratamiento.

## 1.39. Operaciones

La operación correcta de los biodiscos tiene por objeto mantener el grado de tratamiento deseado, minimizando los problemas de operación y coste.

Los problemas en el funcionamiento de un sistema de biodiscos se presentan cuando se ha proyectado un número de discos inadecuado, o si la velocidad de rotación de los mismos es insuficiente para aportar el oxígeno necesario en relación con la carga orgánica que llevan las aguas residuales a depurar. La estrategia consiste en equilibrar estos dos criterios.

Ahora bien, un sistema que tiene un único eje de discos en un depósito con una velocidad única, tiene poca flexibilidad para optimizarlo. Por el contrario, un sistema de varias etapas, con un motor de velocidad variable en cada etapa, tiene una gran flexibilidad.

### *1.39.1. Optimización del sistema*

La optimización del sistema pasa por medir la concentración de oxígeno disuelto en el agua residual y la DBO<sub>5</sub> en el efluente. La experiencia del operador, así como los datos obtenidos anteriormente, pueden ser la base para predecir el comportamiento del sistema. En general, descensos prolongados de caudal o en la carga orgánica, deben suponer la parada de una o más etapas del sistema de biodiscos.

### *1.39.2. Parada de los biodiscos*

Cuando por causas varias hay necesidad de parar los biodiscos, se deben vaciar los depósitos, haciendo girar de vez en cuando los discos para prevenir la formación de cargas desequilibrantes, que pueden provocar problemas de tracción cuando se pretenda una nueva puesta en marcha.

Si la parada se ha prolongado por varios días, la biopelícula puede haber muerto, por lo que hará falta más tiempo para conseguir el funcionamiento correcto del sistema. Por ello, a las áreas de producción de aguas residuales estacionales, los biodiscos de deben poner en funcionamiento unas semanas antes de su optimización.

### *1.39.3. Puesta en marcha*

Antes de poner en marcha un sistema de biodiscos se deben estudiar a fondo las instrucciones del manual de operación y mantenimiento.

En los primeros días de funcionamiento se empezará a formar una débil película de biomasa, que poco a poco irá aumentando. Como es lógico, en este tiempo el sistema no funcionará adecuadamente, por lo que es recomendable que se haga una recirculación de las aguas residuales, recirculación que irá disminuyendo poco a poco conforme va aumentando la biomasa adherida a los discos, aumentando por otra parte el caudal a depurar.

El proceso de la puesta en marcha abarca:



1. El establecimiento de una película de biomasa que va progresivamente creciendo. Según aumenta la biomasa va aumentando el grado de depuración, hasta que se consiguen los resultados operacionales previstos para las cargas hidráulica y orgánica, así como para la temperatura de diseño.
2. La formación de biomasa se inicia a las 24 horas, siendo observable visualmente a las 48 horas. El crecimiento pleno se alcanzará en el plazo de unas 3 semanas para temperaturas altas y de unas 8 semanas para temperaturas bajas.
3. Una vez que se llene el depósito, deben empezar a girar los discos inmediatamente, a fin de prevenir cualquier desequilibrio en el crecimiento de la biomasa.
4. Deben eliminarse de las aguas residuales, antes de entrar en el depósito, objetos extraños, flotantes o no, a fin de prevenir daños en los discos o atascos en las canalizaciones.

#### *1.39.4. Dificultades en los procesos de operación*

- a) Pérdida de biomasa. A veces ocurre que hay un excesivo desprendimiento de la biomasa fijada al disco. Esto es normal si ocurre durante las dos primeras semanas de puesta en marcha, o sea, al iniciar la operación. Si esto ocurre se produce cuando está funcionando normalmente, sufriendo dificultades el proceso, puede ser debido a que las aguas residuales a depurar contienen sustancias tóxicas o inhibitorias, que actúan como venenos para la biomasa.
- b) Desarrollo de biomasa blanca. A veces ocurre que se desarrollan organismos de color blanco sobre los discos. Esto, normalmente, no afecta de un modo inmediato sobre el proceso, si los organismos blancos (probablemente thiotrix o beeggiatoa) aparecen en las áreas limitadas por los medios. Si esta forma de biomasa domina en la superficie, puede esperarse una reducción en los niveles de depuración. La aparición de esta anomalía puede ser debida a que sean sépticas las aguas residuales influentes y/o con altas concentraciones de ácido sulfhídrico, ya que el agua residual séptica y las descargas industriales con alta concentración de ácido sulfhídrico, pueden provocar el aumento y predominio de microorganismos filamentosos blancos sobre el disco.
- c) Disminución de la eficiencia depuradora. Esto es debido a diversas causas, siendo las más importantes:
  - a. Por disminución de la temperatura de las aguas residuales. En efecto, la temperatura de las aguas residuales por debajo de 10 °C, provoca la reducción de la actividad biológica y el descenso, por tanto, de su poder de biodegradación. Se debe tener en cuenta, por

otra parte, que la temperatura es un parámetro muy crítico en las plantas diseñadas para realizar la nitrificación.

- b. Por variaciones grandes de caudal
- c. Por variaciones grandes de la carga orgánica
- d. Por alteraciones de pH y alcalinidad. En efecto, cada agua residual tienen un nivel de pH óptimo, entre 6.5 y 8.5. si éste intervalo se altera por algún tiempo, influirá en el correcto funcionamiento del biodisco. Cuando se quiera lograr una buena nitrificación, el pH y la alcalinidad son parámetros muy críticos y el pH debe ser mantenido tan próximo a 8.4 como sea posible. El nivel de alcalinidad para la nitrificación, en el agua residual, debe ser mantenido a un mínimo de 7.1 veces la concentración de amonio del influente, para permitir que la reacción se complete sin afectar negativamente a los microorganismos.
- e. Acumulación de sólidos en los discos. Si la eliminación previa de sólidos en suspensión no es la adecuada, pueden éstos bloquear el paso del agua residual en la biopelícula y provocar el desarrollo de malos olores, ejerciendo por otra parte, una influencia perjudicial en el rendimiento del proceso.

Los problemas que plantean el desequilibrio de masas situadas en los discos se pueden solucionar eliminando el exceso de biomasa, aumentando la velocidad de giro, invirtiendo el giro, o por medio de una aireación suplementaria. Cuando estas medidas no sean suficientes habrá que recurrir a parar el sistema y volverlo a poner en marcha.

La puesta en marcha de una unidad que ha estado parada 24 horas o más, tiene como operación preliminar el vaciado del depósito, limpieza de los discos con una manguera, llevado de nuevo de los depósitos al nivel de diseño y poner los discos en funcionamiento cuando se haya alcanzado este nivel. Los discos no se pondrán en movimiento antes de que no se haya llenado completamente del depósito o reactor.

#### *1.39.5. Control de funcionamiento*

Para llevar a cabo los procesos de control en un sistema de biodiscos, se deben realizar un mínimo de análisis químicos que nos indiquen su rendimiento diario, tanto del agua residual influente como el efluente. Estos análisis son:

- Caudal
- Sólidos en suspensión
- DBO<sub>5</sub>
- DQO
- Oxígeno disuelto
- pH

- Temperatura

Si se desea que se produzca la nitrificación, además se deben analizar:

- Amoníaco
- Nitrógeno Kheldall
- Nitratos
- Alcalinidad

El caudal se debe controlar, debido a que afecta a las cargas hidráulica y orgánica, determinando el tiempo de retención del agua residual en los reactores.

En relación con el oxígeno disuelto, es importante controlar su concentración para el correcto funcionamiento de la primera etapa, por lo que deben hacerse mediciones diarias. Los valores típicos para el oxígeno disuelto en la primera etapa irán de 0.5 a 1.0 mg/l y de 1 a 3 mg/l e incluso mayor en la última etapa.

Aunque ya se ha citado, se insiste en que el color de la biomasa también indica la optimización del proceso, siendo de un color marrón-grisáceo en la primera etapa de la biodegradación carbonácea (mayor crecimiento de la biomasa) y parduzco en la etapa de nitrificación (menor crecimiento de la misma).

Como es lógico, debido a que se realizan, en esencia, dos procesos: la biodegradabilidad y la sedimentabilidad en dos unidades diferentes del sistema, se deben controlar estos separadamente.

Otra forma de seguimiento del proceso es la observación de la microbiología. Ya de una manera visual, el operador puede tener indicios de la buena marcha del sistema mediante el color de la biomasa. La observación microscópica puede ser la que permita confirmar sus predicciones visuales.

Un cultivo de biomasa sano, en la etapa de eliminación de la materia orgánica tiene, normalmente, un color marrón o gris, y pasa a gris oscuro, negro o blanco cuando no está sano. En la etapa de nitrificación, la biopelícula debe ser fina, parduzca e irregular.

#### *1.39.6. Ventajas e inconvenientes*

Se citan como ventajas de los biodiscos, las siguientes:

- Su alto rendimiento en la eliminación de sustancias carbonadas y nitrogenadas, en esencia, carbono y nitrógeno.
- El tiempo de retención del agua residual en el biodisco es muy pequeño.
- El muy grande la capacidad de asimilar las puntas de caudal y la carga contaminante, así como la posible presencia de carga tóxica esporádica.
- Son muy pocos los lodos que se generan y tienen una alta sedimentabilidad y filtrabilidad.
- El proceso se controla fácilmente, no siendo necesario, para su correcto funcionamiento, especialistas cualificados.
- Los costos de operación y mantenimiento son muy bajos, ya que es muy poca la energía eléctrica que se necesita para hacer girar los discos.
- La emisión de aerosoles es muy pequeña.

Los inconvenientes son:

- Son muy vulnerables al mal tiempo, a menos que se protejan en cobertizos adecuados.
- Si la transferencia de oxígeno es insuficiente para satisfacer la demanda inmediata, como consecuencia de la pequeña velocidad de los discos, puede plantear problemas desagradables de olores.
- Las averías de los discos, ejes impulsores, motores, etc.

# **CAPÍTULO 6: LAGUNAS**

Durante los últimos años, un sistema de depuración de aguas residuales con materias orgánicas biodegradables que se basa en el uso de lagunas o estanques especialmente preparados, a los cuales se les llama estanques o lagunas de estabilización. Según el Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española, laguna es un depósito natural de agua, generalmente dulce y, por lo común, de menores dimensiones de un lago. Estanque es un receptáculo de agua construido para proveer al riego, criar peces, etc. Este tipo de estanques se utilizaron primero en zonas de climas calurosos y días soleados, pero se ha visto que operan también, con resultados satisfactorios en regiones de climas más fríos y con menos horas de sol.

Hoy día, son también utilizadas las lagunas: como sedimentadores, para enfriamiento de las aguas, su desinfección, oxidación, etc. En general, el grado de depuración de las aguas residuales depende del tiempo de permanencia de las mismas en la laguna, clima de la zona y de la carga orgánica del agua a depurar.

Las experiencias recientes han demostrado que el tipo de depuración por lagunaje se puede utilizar en cualquier parte. Las lagunas son de construcción barata y requieren un mínimo de operación. En general su uso se limita a las poblaciones pequeñas en donde puede disponerse de terreno, ya que se requieren grandes superficies.

Las lagunas son, en realidad, depósitos donde se abandonan las aguas residuales con materia orgánica biodegradable, desarrollándose ecosistemas naturales que actúan sobre los compuestos orgánicos utilizando su energía. Mediante retención prolongada se logra el desarrollo de las condiciones naturales, bajo las cuales es posible la biodegradación de la materia orgánica. Estos ecosistemas son alterados por el caudal de aguas residuales con materia orgánica que entra regularmente en las lagunas.

En las lagunas se realizan dos procesos naturales fundamentales: el heterótrofo, desarrollado principalmente por las bacterias y el autótrofo, realizado por las algas. Este equilibrio alga/bacteria es la base de los procesos biológicos que se realizan en las lagunas. A su vez, las algas constituyen el alimento de pequeños animales (rotíferos, crustáceos) que posteriormente lo serán de otros (larvas de insectos) y ambos de los peces.

Como se ha señalado repetidamente, la base del tratamiento biológico en general y de las lagunas en particular estriba en la capacidad natural que poseen los microorganismos en descomponer los compuestos orgánicos complejos, utilizando la energía liberada para contribuir a sus funciones vitales (nutrición, relación, reproducción). Parte de la materia orgánica se usa para producir energía y convertirla en productos estables finales (anhídrido carbónico, agua, amoníaco, etc.) y el resto es utilizado en la formación de nuevas células que se pueden recoger y eliminar por sedimentación antes de que el efluente estabilizado sea descargado en un cauce receptor.

La transformación de la materia orgánica en medio aerobio, tiene lugar por fermentación, y es llevada a cabo por las bacterias heterótrofas anaerobias, en dos fases:

- Acidogénesis, que mediante la intervención de enzimas extracelulares, provocan la transformación de la materia orgánica insoluble, en compuestos orgánicos solubles, los cuales son transformados a su vez, por las bacterias, en ácidos grasos volátiles, anhídrido carbónico, hidrógeno y metabolitos diversos.
- Metanogénesis, en la que se produce metano y anhídrido carbónico. En ambos casos hay desarrollo de microorganismos.

En resumen, en las lagunas se produce la biodegradación de parte de la materia orgánica, aeróbica y anaeróticamente, estabilizándola. Además se realiza otra función principal, que es la eliminación de los microorganismos patógenos.

## 1.40. Tipos de lagunaje

Una clasificación de las distintas lagunas se representa en la siguiente imagen, siendo ordenadas las lagunas desde el punto de vista del proceso biológico que se pretende se realice en la misma, del grado de tratamiento que se quiere alcanzar y según el tipo de vertido que van a admitir.

En general, un lagunaje suele realizar una función de depuración en tres fases, asociadas cada una con un tipo específico de lagunas, las cuales están comprendidas en un proceso de acción aerobia, otro de acción facultativa y el último de maduración.

**Tabla 6.** Clasificación de los tipos de lagunaje

<b>Según el proceso biológico</b>	Aeróbicas	Aireación natural (fotosíntesis y/o difusión del aire a través del agua)	Lagunas naturales
		Aireación mecánica	Lagunas aireadas
	Anaerobias Facultativas		
<b>Según el grado de tratamiento</b>	Primario Secundario Terciario		
<b>Según el tipo de vertido</b>	Sin vertido	Lagunas o estanques de evaporación	
	Vertido controlado		
	Vertido libre		

#### 1.40.1. Según el proceso biológico

- Lagunas aerobias. Se llaman así a unas lagunas de poca profundidad, en las que la luz del sol penetra hasta el fondo de las mismas, manteniendo las algas, que pondrán en libertad el oxígeno, mediante la función clorofílica, en toda la masa de líquido. Esta función clorofílica se realiza con el concurso de la luz solar durante las horas diurnas. También se realiza la disolución de oxígeno del aire, por difusión, a través de la superficie del agua, durante las 24 horas del día. Merced a estos dos procesos, disolución y función clorofílica, se mantiene permanentemente, en toda la masa de agua, una alta concentración de oxígeno.

En estas lagunas, las bacterias, que son las que actúan principalmente en la estabilización de la materia orgánica, y las algas, tienen una relación simbiótica, ya que si las algas sintetizan material orgánico a partir del dióxido de carbono, nutrientes inorgánicos y agua, utilizando la energía del Sol, las bacterias heterótrofas utilizan el material orgánico, presente en las aguas residuales en funciones energéticas y sintéticas.

En los procesos fotosintéticos es oxidada el agua, poniendo en libertad electrones, protones y oxígeno molecular. El oxígeno actuará como aceptor de electrones. El dióxido de carbono y los nutrientes, puestos en libertad como resultado del metabolismo bacteriano, son utilizados por las algas en sus procesos de crecimiento. Durante la fotosíntesis, las algas actúan como "factores orgánicos" que vierten en el medio que los rodea grandes cantidades de compuestos orgánicos. Cuando cesa la fotosíntesis, las algas metabolizan lo excretado y otros compuestos orgánicos presentes en el medio, formando masa celular, mientras que el dióxido de carbono, estará disponible para realizar la fotosíntesis cuando aparezca la luz del sol.

Pueden diferenciarse tres tipos de lagunas aerobias: de alta carga, de baja carga y de maduración.

(1)Alta carga: su finalidad es la eliminación de nutrientes y obtención de tejido celular de algas con el fin de aprovechar su riqueza de proteínas. Son de poca profundidad (0.15 a 0.45 metros). El efluente es coloreado (verde) con sólidos en suspensión altos (algas).

(2)Baja carga: profundidad mayor de 0.45 metros. Se utilizan en el tratamiento de efluentes secundarios, para completar su estabilización.

(3)Maduración o terciarias: se utilizan para eliminar nutrientes.

- Lagunas aireadas. En éstas, la labor realizada por las algas o por el oxígeno disuelto del aire, se complementa o reemplaza mediante aireación con dispositivos mecánicos (turbinas y soplantes), que pueden tener la función adicional de agitar las aguas de la laguna. Cuando se emplea la aireación mecánica, el crecimiento de las algas cesa o es muy reducido, como consecuencia de la turbidez o la turbulencia.

Hay dos tipos básicos de lagunas de aireación:

- Las que se diseñan con niveles de potencia mecánica suficiente para mantener los sólidos en suspensión (lagunas aerobias aireadas). En éstas, la aireación realiza dos funciones: la de aportar oxígeno a la masa de agua y la de mantener en suspensión los sólidos insolubles aportados por las aguas residuales crudas.
- Las diseñadas con niveles de potencia mecánica menor que las anteriores, sólo para mantener el oxígeno disuelto en toda la masa de líquido (lagunas facultativas aireadas). En este caso, los sólidos que las aguas residuales llevan en suspensión, sedimentan en el fondo de la laguna, donde son descompuestos anaeróbicamente. Como es lógico, la energía consumida en este tipo de lagunas es menos que en la anterior. Las ventajas de las lagunas aireadas son:

Comodidad de operación y mantenimiento

Fácil mezcla de las aguas residuales que llegan a la laguna

Alta capacidad de disipar calor

Los inconvenientes, para todas las lagunas, son:

Necesidad de grandes extensiones de terreno

Dificultad de modificar el proceso

Alta concentración de sólidos en suspensión en el efluente

Sensibilidad de los procesos a las variaciones de temperatura ambiente

- Lagunas anaerobias. Son profundas y en las mismas casi no se encuentra oxígeno disuelto. Actúan como digestor en el que las bacterias anaerobias descomponen la materia orgánica.

La carga orgánica, y la disponibilidad de oxígeno disuelto, determinan si la actividad biológica se realizará bajo condiciones aerobias o anaerobias. En



efecto, una laguna puede ser mantenida en condiciones anaerobias, si llega a la misma una carga orgánica tal, que su demanda de oxígeno sea mayor que el producido en la fotosíntesis más el aportado por difusión a través de la superficie libre del agua. La anaerobiosis aumentará si se reduce la superficie y se aumenta la profundidad ya que se disminuye el aporte de oxígeno por difusión. Esto, unido a la turbidez, hace que se impida la penetración de la luz solar, haciendo despreciable el crecimiento de algas. Por otra parte, la introducción de oxígeno es la parte anaerobia se puede evitar construyendo una cámara de digestión especial en el fondo de la laguna anaeróbica, donde se acumularán los lodos.

Para conseguir las condiciones anaeróbicas, la profundidad de las laguna debe ser un mínimo de unos 3 metros y de poca superficie, para que permita conservar la energía calorífica. Los tiempos de retención suelen ser de un mínimo de 5 días.

La temperatura influye notablemente en el desarrollo del proceso, por lo que, para compensar el descenso de la actividad en épocas frías, se recomienda aumentar los tiempos de retención.

Las lagunas anaerobias son usadas principalmente para realizar el tratamiento de aguas residuales e industriales con alta carga orgánica. El efluente de estas lagunas debe sufrir un tratamiento adicional, antes de ser vertido al cauce receptor. El tratamiento anaeróbico ofrece las ventajas siguientes:

La laguna que debe tratar el efluente que procede del tratamiento anaerobio, es más pequeña que si no existiese aquel.

No aparecen lodos flotantes en las épocas de calor.

Tampoco aparecen bancos de lodos en las lagunas finales

El mayor problema que surge en las lagunas anaerobias, es el olor. En control del olor puede ser solucionado reduciendo la carga orgánica, a fin de que pueda establecerse una capa aeróbica en la superficie de la laguna o recircular el efluente.

- Lagunas facultativas. Son de carácter intermedio entre las aerobias y las anaerobias, de profundidad media, en las que la capa superior es aerobia (debido al desarrollo de algas), y la parte inferior es anaerobia.

De todas las clases de lagunas, las facultativas son las que más se utilizan para la depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas comunidades.

En estos tipos de lagunas, los sólidos en suspensión que llevan las aguas residuales que entran en ellas, sedimentan formándose, en el fondo, una capa anaeróbica. Los microorganismos que ocupan esta región no requieren, en el metabolismo energético, oxígeno molecular como aceptor de electrones, (incluso es un veneno para los mismos), usando para realizar esta misión otras especies químicas, produciéndose en el lodos depositado en el fondo, tanto la fermentación ácida como la metánica.

La zona facultativa existe justo encima de la zona anaeróbica. Esto significa que el oxígeno molecular no estará disponible, es ésta región, las

24 horas del día. Generalmente, la zona es aeróbica durante el día y anaeróbica durante la noche.

Por encima de la zona facultativa existe una zona aeróbica, la cual contiene oxígeno molecular durante las 24 horas de día, siendo suministrado, como ya se ha visto, tanto por difusión a través de la superficie libre del líquido, procedente del aire, como el liberado por la función clorofílica.

Su profundidad varía, generalmente, entre 1.0 y 2.5 metros y los tiempos de retención entre los 7 y 10 días.

Estos tratamientos son muy utilizados porque:

- Los largos tiempos de retención proporcionan la facultad de manejar grandes fluctuaciones de caudal y carga, con efectos no significativos sobre la calidad de efluente.
- El costo de construcción, operación y mantenimiento es mucho menos que en los otros sistemas biológicos, los cuales proporcionan tratamientos equivalentes.
- Por el contrario necesitan grandes extensiones del terreno.

#### 1.40.2. Según el grado de tratamiento

- Lagunas primarias. Estas lagunas reciben directamente las aguas residuales crudas, o con un único tratamiento de desbaste. Actúan como un sedimentador primario.

En un sistema de depuración por lagunaje, la laguna situada en primer lugar ejerce esta función. Debe diseñarse con gran cuidado, ya que si no se realiza adecuadamente, puede ser causa de grandes trastornos del sistema, no siendo el menor la producción de olores nauseabundos a bastante distancia.

El conjunto de operaciones de desbaste, tamizado, desarenado y sedimentación primaria, recibe el nombre de tratamiento primario.

- Lagunas secundarias. Se llaman así a las que reciben las aguas residuales después de haber sido sometidas a un tratamiento primario. Estas pueden ser aerobias (aireadas o no), anaerobias o facultativas.
- Lagunas de maduración. Son las lagunas que se sitúan al final de una planta convencional de tratamiento biológico y por lo tanto reciben el nombre de efluentes de aguas residuales depuradas a un nivel secundario. Su función principal es obtener una mejora considerable en sus características bioquímicas, eutróficas y bacteriológicas, reduciendo fundamentalmente el contenido de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y/o microorganismos patógenos.

#### 1.40.3. Según el tipo de vertido

- Lagunas de evaporación. Son las lagunas que se han diseñado de tal suerte que todas las aguas residuales que entran en las mismas permanecen en ellas hasta lograr una evaporación total, por lo que no tienen vertido alguno. En este tipo de lagunas el nivel del líquido se suele mantener constante, ya que las pérdidas por evaporación e infiltración se

calcula sean iguales al caudal del influente más la precipitación pluviométrica sobre las lagunas.

- Vertido controlado. Son las lagunas donde el caudal que se vierte en el cauce receptor está de acuerdo con una determinada secuencia relacionada, entre otros posibles factores, con la variación de la calidad del agua depurada o del caudal del cauce receptor. Tienen un elevado tiempo de retención, variable de acuerdo con las características enunciadas anteriormente.
- Vertido libre. En ellas, el caudal de salida es aproximadamente igual al de entrada menos el evaporado.

## 1.41. Procesos naturales básicos

Por lagunado se entiende, en general, el natural, es decir, el no aireado sea aerobio o anaerobio, dependiendo de la profundidad de la laguna, la transparencia del agua, etc. En el mismo se pueden encontrar todos los componentes de un ecosistema acuático: un componentes abiótico (biotopo), formado por los factores físicos y químicos que constituyen el medio y está determinado por las condiciones ambientales: pH, temperatura, pluviometría, microclima, salinidad, etc., y otro biótico (biocenosis), constituido por el conjunto de las poblaciones de seres que viven en el seno del biotopo de la laguna, y está formado por todos los organismos presentes (productores, consumidores y descomponedores), existiendo una interacción entre la biocenosis y el biotopo mediante relaciones nutricionales y energéticas. Además existe una fauna de fondo (fauna de bentos), que cumple también una labor importante dentro de la laguna.

En difícil enumerar las especies de los distintos organismos que se pueden presentar en una laguna, ya que las mismas están sujetas a cambios, tanto estacionales como de localización en la laguna, al tipo de laguna, situación en el proceso, etc. Únicamente se puede señalar que en las lagunas profundas la distribución de la biocenosis será vertical, similar a la de un lago.

Debido a esto, en el estudio de una laguna deben considerarse, en su conjunto, las poblaciones de animales y vegetales que se desarrollan en la misma, así como su diversidad, abundancia, etc., ya que una actuación puntual puede tener reacciones insospechadas en el conjunto del sistema.

En general, en una laguna existen tres grandes grupos de microorganismos:

- Bacterias
- Fitoplancton
- Zooplancton

Aunque los dos primeros juegan el papel más importante en las funciones biológicas que se realizan en una laguna (eliminación de microorganismos patógenos y estabilización de la materia orgánica), se ha comprobado que el zooplancton también contribuye, aunque en menor grado, a la realización del fin propuesto.

En las lagunas, se encuentra:

- Una interfase aire-agua en la superficie, donde se encuentran el zooplancton y el fitoplancton (NEUSTON).

- Una masa de agua, donde se encuentran los animales y vegetales con movimientos propios (NECTON) o sin movimientos propios (PLANCTON), y sólidos en suspensión (PERIFITON).
- Por último, una interfase agua-sedimento (BENTON)

Los complicados mecanismos naturales que intervienen en la estabilización de la materia orgánica presente en las aguas residuales de una laguna, pueden ser explicados a la luz de los conocimientos actuales, estudiando los principales parámetros que intervienen en la misma y su evolución a lo largo de la laguna. Estos son:

- Físicos (caudales, sólidos en suspensión y disueltos, temperatura, pH, etc.)
- Químicos: oxígeno disuelto, nutrientes, etc.
- Biológicos: bacterias, protozoos, algas, etc.

En conocimiento en profundidad de estos parámetros ayudará a realizar una gestión correcta de la laguna.

## 1.42. Línea del agua

En una laguna que tenga una alimentación por un solo colector, el caudal de agua a depurar que llega a la misma, varía constantemente debido a las causas siguientes:

- Variación del caudal de agua a tratar a lo largo de las 24 horas del día
- Aportes esporádicos como consecuencia de precipitaciones atmosféricas
- Posibles aportes extraños: aguas procedentes de manantiales, fuentes, infiltraciones de diversos orígenes, etc.

Una vez en la laguna el agua a depurar, pueden existir pérdidas como consecuencia de la evaporación, potenciada al máximo en los llamados estanques o lagunas de evaporación, y ganancias esporádicas como consecuencia de precipitaciones atmosféricas caídas sobre la laguna.

Si se llama

$Q_e$  al caudal efluente

$Q_{ar}$  el caudal afluente procedente de las aguas residuales

$Q_{pa}$  al caudal procedente de las precipitaciones atmosféricas

$Q_{ev}$  el caudal evaporado en la laguna

Se tiene:

$$Q_e = (Q_{ar} + Q_{pa}) - Q_{ev} \quad (39)$$

De lo anterior se deduce que es esencial para el estudio de una laguna, la construcción de un dispositivo para medir el caudal. Sin un conocimiento adecuado del caudal de agua residual que entra en la laguna, es imposible determinar la carga orgánica que entra en la misma, posible evolución del aterramiento, etc.

Cuando el lagunaje es alimentado por varios colectores, el estudio de los caudales vendrá determinado por la disposición de las distintas lagunas estructuradas en el proyecto.

Por otra parte, el flujo hidráulico en una laguna es afectado por:

- Forma de cada laguna
- Su volumen
- Velocidad a que circula el agua en cada laguna
- Presencia de zonas muertas
- Dispersión
- Formación de cortocircuitos
- Reparto de las distintas densidades, como consecuencia de la variación de las temperaturas del agua en cada laguna
- Ubicación de sus entradas y salidas del agua residual a depurar en cada laguna

Estos factores afectan a:

- La dispersión de la materia orgánica
- Tiempo medio de retención
- Eficacia de las distintas lagunas que constituyen el lagunaje (biodegradación de la materia orgánica, eliminación de bacterias).

En relación con el volumen de las lagunas, es la profundidad la que puede crear problemas, ya que al aumentar esta, aumentan los espacios muertos, alterando, por tanto, los valores teóricos del tiempo de permanencia del agua a depurar en cada laguna.

Es importante tener en cuenta el efecto del viento, ya que puede influir significativamente en las zonas muertas, y en la dispersión del agua residual en las lagunas poco profundas. En efecto, cambios en la velocidad y en la dirección del viento, pueden provocar variaciones en los modelos de flujo, realizando cambios importantes en la posición de las distintas zonas de las lagunas, ya que las velocidades inducidas por el viento, en la superficie de las mismas, pueden ser 100 veces mayores que la velocidad media de flujo, en condiciones de calma.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que flujos de velocidad inducida en la superficie, pueden ser acompañados por flujos en la dirección opuesta en las capas bajas, y flujos en espiral en las esquinas de las lagunas. Las velocidades superficiales, inducidas por el viento, y los flujos secundarios asociados con ellas, promueven una mezcla lateral y vertical a expensas de las zonas muertas y las zonas de flujo advectivo. Por esto, los vientos de gran intensidad tienden a incrementar el volumen teórico de la laguna, debido a que se establecen condiciones de mezcla completa.

La velocidad a que se circula el agua está influenciada por el efecto causado por los dispositivos de entrada y salida de las lagunas, los márgenes y el fondo de las mismas. Estos efectos hacen que parte de la masa de agua presente en cada laguna alcance la salida de la misma en un tiempo menor o mayor que el tiempo medio calculado.

Zonas muertas: las zonas en que la velocidad de circulación es mucho menor que la calculada, de acuerdo con el tiempo medio de permanencia, se llaman "zonas muertas". La presencia de estas zonas hace que el volumen efectivo de la laguna sea menor que el calculado teóricamente. También será menor el tiempo

medio de permanencia o retención (de 5 a 10 veces). (El tiempo de permanencia o de retención es definido "como la relación entre el volumen de la laguna dividido por el caudal que pasa a través de ella"). Es este caso la eficacia de la laguna disminuye.

En las zonas muertas es muy alto el porcentaje de sedimentación de los sólidos en suspensión, debido a la disminución de la velocidad, y por tanto a un aumento de periodo de permanencia.

Las zonas muertas tienden a formarse en sitios poco profundos, áreas hidráulicamente rugosas, márgenes, esquinas o áreas situadas detrás de pantallas y otros obstáculos.

Dispersión: la velocidad a que circula el agua también está influenciada por la dispersión causada por el viento y por las variaciones vertical y horizontal de las velocidades zonales. En general, la velocidad a que circula el agua residual es mayor en la superficie (máxima a 2/3 del fondo), disminuyendo hacia el fondo y en las orillas, como consecuencia del rozamiento producido.

El estudio del tiempo de permanencia medio y la dispersión, pueden investigarse por medio de trazadores.

Cortocircuitos: una acción contraria a la ejercida por las "zonas muertas" es la ejercida por los llamados cortocircuitos, palabra que se utiliza para describir aquella situación en la cual un parte del agua que entra en la laguna, siguiendo líneas preferenciales, permanece en la misma un tiempo mucho menor que el teórico.

### 1.43. Línea de los sólidos

Las aguas residuales urbanas ejercen una acción de transporte cuya cuantificación es de la mayor importancia, ya que si por un lado las partículas que llevan en suspensión condicionarían las dimensiones de los reactores destinados a eliminarlas de una u otra forma, los sólidos disueltos condicionan el desarrollo de los distintos microorganismos que constituyen el biotopo, siendo la composición física y química de las aguas residuales, la que determinará el tipo de microorganismos que se van a desarrollar en el seno de las aguas en cuestión.

Como repetidamente se ha indicado, el agua residual urbana lleva en su seno, fundamentalmente, materia orgánica biodegradable, disuelta o en suspensión. Esta materia orgánica es la base de los procesos que se realizan en una laguna, ya que es la que aporta los nutrientes y los compuestos carbonáceos energéticos necesarios para que se desarrolle una biocenosis en las aguas. Por otra parte, estos procesos están en estrecha relación con la concentración de oxígeno, libre o combinado, ya que su consumo permitirá la liberación de energía, necesaria para el desarrollo de la vida.

Tanto los sólidos en suspensión como los disueltos, pueden ser fijos o volátiles, considerando generalmente que los sólidos fijos corresponden, en una primera aproximación, a los inorgánicos, y los volátiles a los orgánicos. Una parte de los sólidos en suspensión son capaces de sedimentar (sólidos sedimentables), cuando disminuye la velocidad del agua, mientras que el resto permanece en suspensión (sólidos no sedimentables, coloidales).

La materia en suspensión sedimentable se deposita al disminuir la velocidad del agua y se concentra en el fondo de la laguna, en donde se desarrollan los procesos de fermentación anaerobios, que tienen como consecuencia la mineralización de la materia orgánica de que está constituida la mayor parte de la materia sedimentada. Al mismo tiempo, parte de las sustancias que se forman en la biodegradación se solubilizan y otras pasan a la atmósfera en forma gaseosa.

La línea de sólidos de un lagunaje (serie de lagunas), es un factor a tener en cuenta para conocer la efectividad de la sedimentación de los mismos, ya que, en las primeras lagunas del sistema, es donde se realizará más intensamente la sedimentación de las partículas más gruesas.

La concentración de los sólidos en suspensión varía, en un lagunaje, a lo largo de las distintas laguna. En efecto, los sólidos en suspensión aportados por el influente se sedimentan rápidamente, casi todos en la primera laguna. Los sólidos no sedimentables, coloidales, precisan más tiempo para neutralizar sus cargas (floculación, coagulación, etc.) o bien, en menor proporción, para ser ingeridos por determinados organismos llamados filtradores.

Además, en la sedimentación, se eliminarán por adsorción muchas sustancias inorgánicas y orgánicas (vivas o muertas), disueltas o en suspensión en el agua.

Por otra parte, los sólidos orgánicos sedimentados pueden, bien por fermentación anaerobia, bien por hidrólisis, romperse en unidades de cadena más corta, pasando a suspensión e incluso a disolución. Esto hace que, a veces, determinados parámetros de control, aumenten en lugar de disminuir, (feedback) a lo largo de la laguna (DBO, DQO, amonio, etc.).

En otro orden, durante los procesos fisicoquímicos y biológicos que se realizan en las distintas lagunas, se forman grandes cantidades de algas, que contribuirán a engrosar los sólidos en suspensión en el efluente final. Como es lógico, la mayor cantidad de algas, y por tanto, de sólidos en suspensión, en las lagunas finales del sistema, se producirá en los meses donde mayor sea la temperatura, con mayores horas de sol.

La sedimentación proporciona un mecanismo adicional para la eliminación de parte de la materia orgánica biodegradable que se encuentra en forma de sólidos en suspensión. A causa del largo tiempo de retención de los sólidos en el fondo de la laguna, y de la biodegradación anaerobia citada, se produce la puesta en libertad de los productos gaseosos formados, entre otros el amoniaco y el ácido sulfhídrico, los cuales hacen que los lodos sedimentados sean removidos y algunos llevados a la superficie, ayudando a la mezcla de las aguas de la laguna. Por otra parte, contribuyen a la eliminación de la materia orgánica biodegradable. Lo mismo que con otras oxidaciones anaerobias, la energía utilizable (disponible) de la Metanogénesis es baja, y consecuentemente tiene una baja producción de células; aproximadamente el 70 % de la DBO<sub>5</sub> eliminada en una laguna anaeróbica, será en la forma de gas metano.

El metabolismo anaerobio de los sedimentos del embalse hace que aumente el tiempo necesario para vaciar la laguna de sedimentos (normalmente de 5 a 10 años). Ahora bien, se debe contemplar la posibilidad, cuando se diseña una laguna, de proveerle de facilidades para poder eliminar de las aguas residuales crudas la arena, materiales gruesos, flotantes, etc., mediante tamices, rejas, pantallas, etc., antes de su entrada en laguna, a fin de evitar que estos

materiales entorpezcan el correcto funcionamiento de la misma. Si no se hace así, los materiales gruesos y arenas sedimentarán en el fondo de la primera laguna y contribuirán a un aterramiento más acelerado, mientras que los flotantes se situarán en las esquinas, pudiendo crear problemas sanitarios si no se limpian periódicamente. En general, es mucho más sencillo y barato limpiar un tamiz o una rejilla que eliminar los flotantes o los sedimentos de una laguna.

Debido a la degradación, por fermentación anaerobia, de la materia orgánica sedimentada, se produce una gran cantidad de amonio, que tiene su origen en el nitrógeno orgánico de la materia orgánica, puesto en libertad como amoniaco.

Un acción muy importante que se realiza en las lagunas, durante la sedimentación, es que los microorganismos de menor tamaño, pueden ser adsorbidos por los sólidos en suspensión y arrastrados, con los sedimentos, al fondo de la laguna, mientras que otros, debido a su mayor tamaño (huevos de helmintos, quistes de protozoos) sedimentan con una cierta facilidad, sobre todo si el sistema de lagunaje consta de una serie alta de lagunas con un tiempo grande de permanencia del agua en las mismas. Ahora bien, la eliminación de estos microorganismos por sedimentación del agua, no necesariamente supone la inactivación de los mismos, pudiendo permanecer activos en el sedimento por un tiempo variable, que en muchos casos puede contarse por años. Esto es muy importante, y hay que tenerlo en cuenta, cuando hay que manipular estos sedimentos.

En una línea parecida se encuentran los metales pesados, ya que una de las vías de eliminación es por adsorción de las partículas en suspensión y por absorción de los microorganismos (bioconcentración).

## 1.44. Línea de oxígeno

Dos son los aspectos a considerar en la línea del oxígeno de un lagunaje: la producción y la demanda.

En relación con la producción, un factor a tener en cuenta, cuando se hace un estudio de una laguna, es la concentración de oxígeno presente en las aguas de la misma, ya que su presencia condiciona su funcionamiento, teniendo como consecuencia favorecer el crecimiento de organismos aerobios o facultativos.

Por el contrario, la ausencia de oxígeno facilitará la anaerobiosis de las aguas, lo que, entre otras, tiene como consecuencias:

- Escasez e incluso ausencia de oxígeno en el efluente al verterlo en el cauce receptor.
- Desprendimiento de diversos gases como metano, amoniaco, hidrógeno sulfurado, gas carbónico, etc., productores de malos olores.
- Formación de masas de lodos flotantes en la laguna, lo que, además de no ser estético, aumenta el contenido de sólidos en suspensión de las aguas.

a) Procedencia del oxígeno en las aguas de una laguna. El oxígeno presente en las aguas puede tener su origen:

- En la difusión del aire en la masa líquida a través de la superficie del agua, realizándose esto de una manera natural, por medio de la agitación producida por el viento o artificialmente por medio de aireadores.



- En la fotosíntesis de los seres autótrofos

#### b) Difusión del aire

La capa límite de la interfase aire-agua, monomolecular, se satura de oxígeno desde su formación, al mismo tiempo que se inicia la difusión del agua hacia las capas de agua más profundas. El aporte de oxígeno será función del gradiente de concentración del mismo entre el aire y el agua, del tiempo disponible para la difusión hacia las capas más profundas (esta difusión es muy lenta), y del nivel de renovación de las interfases.

El viento facilitará la renovación constante de la película de aire situada inmediatamente encima del líquido, contribuyendo así a una mejor distribución del oxígeno disuelto. Por otra parte, evita la estratificación de las aguas y el almacenamiento del oxígeno en las capas superiores. De aquí la importancia de conocer sus direcciones dominantes y su máxima intensidad, a fin de aprovecharlos lo mejor posible.

Un medio artificial para lograr la agitación de las aguas, es la utilización de aireadores. Se diferencian de la provocada por el viento, en que ejerce una acción más profunda y violenta, pero más limitada en el espacio. Su efectividad, como es lógico, es mayor que la del viento, y su utilización puede hacerse todo lo intensiva que se desee, de acuerdo con las necesidades de operación, pero tiene el inconveniente de que se necesita disponer de una fuente de energía no natural, la energía eléctrica.

#### c) Liberación del oxígeno por fotosíntesis

Aunque los cambios gaseosos en una laguna, a nivel de la interfase aire-agua, no son despreciables, el aporte más importante de oxígeno se hace por la fotosíntesis de los organismos autótrofos.

La fotosíntesis es controlada por los factores ambientales: luz, temperatura, contenido de oxígeno en el agua, concentración de anhídrido carbónico, etc.

Si se desea alcanzar condiciones anaerobias en una laguna, debe ser inhibida la fotosíntesis de las algas para anular esta fuente de oxígeno, así como la velocidad de utilización del mismo.

La acción de la energía solar es función de la longitud de onda de la luz, de su intensidad y del tiempo que dura la iluminación. Constituye la fuente de energía utilizada por los organismos autótrofos para realizar su síntesis orgánica, ejerciendo, la acción de elevar la temperatura del agua, la parte del infrarrojo del espectro.

La profundidad a la que se ejerce la acción de la luz, es función de la turbidez del medio (sólidos en suspensión orgánicos y/o inorgánicos, fitoplancton, etc.).

Para estimular el crecimiento de las algas, debe ser controlada la carga orgánica que entre en una laguna facultativa, de modo que, la demanda de oxígeno de las aguas residuales afluentes, no exceda a la velocidad a que el oxígeno puede ser suministrado por la fotosíntesis. A causa de las necesidades de luz de las algas, la velocidad en la producción de oxígeno, así como su concentración en el embalse, variará con la profundidad a lo largo del día. A medida que la profundidad aumenta y la luz disminuye, habrá menos oxígeno disponible, por lo que una parte variable del agua de la

laguna, dependiendo de la profundidad, estará desprovista de oxígeno y por tanto, se encontrará en metabolismo anaerobio.

En las lagunas facultativas, la actividad fotosintética de las algas, varía con la intensidad de la luz del sol incidente. A veces, dependiendo de unas lagunas a otras, con la luz del sol intensa, las algas forman densas franjas, de espesor variable, a unos 50 cm de profundidad, variable esta profundidad de unas lagunas a otras. Esto hace que la producción de oxígeno sea tan grande e intensa que no tiene tiempo de difundirse a la atmósfera, alcanzándose la sobresaturación en el agua. Por debajo de esta capa superficial, la concentración de oxígeno disminuye rápidamente debido a que no se realiza la fotosíntesis, y el poco oxígeno que llega por difusión es utilizado por las bacterias heterótrofas para su respiración aeróbica.

Durante el día, con la luz solar, la mayor parte de la materia orgánica presente en la capa superficial oxigenada, es biodegradada por bacterias aerobias facultativas. Cuando decrece la intensidad de la luz incidente, la actividad fotosintética disminuye hasta desaparecer. Entonces, las algas no realizan más función que la respiratoria, por lo que, durante las horas nocturnas, al ser utilizado el oxígeno residual aportado durante el día por la fotosíntesis, la laguna se volverá lentamente anaerobia.

Además de los factores enunciados anteriormente, que influyen directamente sobre el desarrollo integral de los seres autótrofos y por tanto de la liberación de oxígeno, hay otros factores que tienen una acción indirecta, como es el antagonismo de los organismos, predación, destrucción química del fitoplancton, etc.

#### d) Factores que influyen en la disolución del oxígeno

Como ya se ha citado, la utilización del oxígeno por los organismos exige que el mismo se disuelva en el agua. Los factores que influyen en su disolución, son, entre otros, la temperatura, la que además influye en el metabolismo de los seres autótrofos. Un aumento de temperatura, que por un lado favorecerá el crecimiento de las algas dentro del intervalo óptimo, disminuirá, por otro, la solubilidad del oxígeno en el agua. Cuando la producción de oxígeno es superior al consumo, entonces se alcanza la sobresaturación, siendo liberado a la atmósfera en forma gaseosa.

Otros factores también influyen de una manera más o menos efectiva en la disolución del oxígeno en el agua, como las sales disueltas, la presencia de detergentes y grasas que impiden que el oxígeno se difunda a través de la superficie, tamaño de las burbujas, etc.

#### e) Consumo de oxígeno en las lagunas

Tres son las líneas que consumen oxígeno en una laguna:

- Respiración de organismos vivos
- Mineralización de las materias orgánicas
- Oxidación de las sustancias químicas reductoras

La respiración es un fenómeno común a todos los seres vivos mediante el cual, se consume el oxígeno y se elimina el anhídrido carbónico. Tanto los seres autótrofos como los heterótrofos respiran durante las 24 horas del día,

consumiendo oxígeno, en tanta mayor cantidad cuando mayor sea la temperatura del ambiente, dentro de los intervalos óptimos de crecimiento.

Otro factor que consume oxígeno es la degradación (biodegradación) y consiguiente mineralización de las materias orgánicas presentes en las aguas residuales a depurar, lo cual se realiza por la acción de los microorganismos. (Este consumo de oxígeno es el que se pretende evaluar con la prueba de la DBO<sub>5</sub>).

Las sustancias orgánicas disueltas en el agua de una laguna tienen una cierta demanda de oxígeno. Esta demanda de oxígeno se incrementa, a lo largo de la laguna, como consecuencia de la solubilización de los sólidos orgánicos insolubles, sedimentados en el fondo de la laguna, por fermentación anaerobia o hidrólisis. De aquí que no sea extraño, como ya se ha citado, que muchas veces la DBO<sub>5</sub> en el centro de la laguna o la salida de la misma, sea mayor que a la entrada. Esto se explica por la disolución de los sólidos en suspensión que se sedimentaron en la laguna.

## 1.45. Temperatura

La temperatura del agua de las lagunas puede constituir un factor limitante, pues los organismos acuáticos son a menudo estenotermos (que no soportan variaciones grandes de temperatura). Por otra parte, los cambios de temperatura producen modelos característicos de circulación y estratificación, que pueden influir sobre la vida acuática.

La temperatura puede actuar sobre los organismos autótrofos, como factor de control o como factor letal, ya que influye sobre el metabolismo, regulando la velocidad a la cual los diversos organismos pueden captar y utilizar las sustancias nutritivas presentes, y como consecuencia liberar oxígeno.

Como ya se ha indicado, cada especie tiene una temperatura óptima de desarrollo, por debajo de la cual el metabolismo se reduce y por encima predomina el catabolismo sobre el anabolismo, es decir, que se consume más oxígeno del que se libera.

En los casos en que la temperatura del agua residual es inferior a 5 °C, la actividad bacteriana puede resultar insuficiente para asegurar el porcentaje de depuración deseado.

## 1.46. pH

El pH influye en la velocidad de reacción y en la supervivencia de los microorganismos. La mayoría de ellos, como ya se ha indicado, tienen un óptimo de desarrollo entre valores de 6.5 y 8.5. a pH superior a 10 o inferior a 4 las bacterias no sobreviven.

Tanto los sistemas aerobios como los anaerobios necesitan condiciones alcalinas para desarrollarse, las cuales mantienen gracias a la actividad fotosintética. Esta actividad contribuye a mantener en la laguna un pH elevado.

Las variaciones de pH también determinan los tipos de especies dominantes, ya que, debido a la relación entre el pH y la fotosíntesis, se produce también un gradiente vertical del mismo, por lo que el valor disminuye con la profundidad.

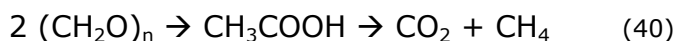
Para mantener la velocidad a que se realiza la fotosíntesis, las algas utilizan una gran cantidad de dióxido de carbono y como resultado, el pH de las aguas en esta zona puede alcanzar hasta 9.5.

## 1.47. Línea del carbono

En el proceso aerobio, el carbono de la materia orgánica se utiliza como fuente de energía para los microorganismos, transformándose en anhídrido carbónico. Estos microorganismos aerobios son principalmente bacterias, pero también existen hongos y protozoos que utilizan el carbono, así como el fósforo y el nitrógeno, para formar nuevas células.

En las lagunas anaerobias, los compuestos carbonados se estabilizan sólo parcialmente, ya que estas lagunas actúan como un digestor anaerobio sin mezcla, en el cual se mantienen las condiciones de anaerobiosis en toda su profundidad, excepto en una estrecha zona de la superficie, donde las condiciones son aerobias, como consecuencia de la disolución de oxígeno del aire.

La degradación de la materia orgánica con producción de metano, en condiciones anaeróbicas, puede expresarse de forma general:



## 1.48. Línea del nitrógeno

Es imprescindible, para el desarrollo de los seres autótrofos, la presencia de determinadas sales minerales, compuestas de nitrógeno, carbono, fósforo así como diversos oligoelementos como calcio, magnesio, cobre, hierro, manganeso, cinc, boro, etc. Estos elementos nutritivos pueden actuar como factores limitantes del crecimiento de las algas. Sin embargo, a partir de un cierto umbral, el crecimiento de las mismas es independiente de estos elementos, ya que, al encontrarse en exceso, intervienen otros factores para limitar el desarrollo de los vegetales, aunque se debe aclarar que los mismos no pueden ser considerados individualmente, ya que frecuentemente hay interdependencia entre ellos.

El ión amonio puede evolucionar hacia la forma amoniacal libre, que puede ir a la atmósfera si su tensión de vapor es la adecuada. Para que se realice éste proceso, es necesario que se dé un ambiente muy oxidado y valores de pH muy elevados, siendo importante también su temperatura y el tiempo de retención del agua en la laguna.

En los lodos del fondo de una laguna, como resultado de la degradación de la materia orgánica nitrogenada sedimentada, también se produce una gran cantidad de ion amonio. La nitrificación en estos niveles no se puede realizar debido al déficit de oxígeno, eliminándose el ión amonio en el efluente de la laguna. Por esto, en una laguna anaerobia, el agua de salida o efluente puede llegar a tener el 20% o más del ión amonio que el influente.

El ión amonio, que es puesto en libertad en el sedimento por degradación anaerobia de la materia orgánica, en particular procedente de las proteínas, es convertido en amoniaco gas cuando se presentan valores altos de pH de la banda activa de las algas.

El amoníaco gaseoso para a la atmósfera y el proceso es conocido como volatilización. Ahora bien, al amoníaco es un gas muy soluble, y no pasa fácilmente de la solución de la fase gaseosa si no es desplazado por otros gases. Por ellos es improbable que la volatilización se al mecanismos más importante para la eliminación del nitrógeno, dadas las relativas condiciones de reposo de la laguna.

El las lagunas facultativas se produce una gran cantidad de nitrógeno. Una fracción quedará fija en el sedimento como nitrógeno orgánico asociado a la biomasa. En la zona intermedia, aerobia/anaerobia, se producirá una nitrificación seguida de una desnitrificación.

En estas lagunas, la presencia de ambos ambientes, aerobio y anaerobio, permite completar, bajo determinadas condiciones, el ciclo de nutrientes: ciclos del carbono, nitrógeno y azufre. En las mismas se ha detectado la presencia de micrococcus denitrificans, thiobacillus denitrificans o pseudomonas sp. En este caso, la formación de nitratos es fácilmente explicable debido a la oxidación del amonio en la zona aeróbica.

En las lagunas de maduración, el nitrógeno soluble está casi exclusivamente en forma de ión amonio, y ésta forma es asimilada por las algas con preferencia al nitrógeno de los nitratos. Este nitrógeno llega a los sedimentos de la laguna como nitrógeno orgánico cuando las algas mueren y sedimentan, y aunque una fracción de él es biodegradable, por encima del 60% permanece sin degradar en el sedimento de la laguna.

Las algas, además de contribuir a la eliminación de los patógenos por la elevación del pH, colaboran, en las lagunas de maduración, a la eliminación del nitrógeno y el fósforo, los cuales utilizan para su desarrollo.

## 1.49. Línea del fósforo

El fósforo es otro de los elementos que juegan un papel importante en el desarrollo de la vida en el seno del agua, ya que si por una parte es imprescindible para el desarrollo de la misma, por otra, cuando su concentración aumenta, actúa de inhibidor del desenvolvimiento de ciertas especies. En la actualidad todos los científicos están de acuerdo en que el fósforo es un factor limitante en el crecimiento del fitoplancton, pero así como para el carbono y el nitrógeno existen mecanismos externos que regulan su concentración en el agua (nitrógeno y anhídrido carbónico procedentes de la atmósfera), no ocurre lo mismos con el fósforo, ya que éste no tiene ciclo atmosférico debido a su tensión de vapor, la cual es muy pequeña.

## 1.50. Línea del azufre

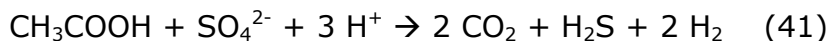
En el agua de una laguna, el azufre se encuentra en los estadios de oxidación siguientes:

Tabla ddddd

<b>Oxidación</b>	-2	0	4	4	6
<b>Fórmula</b>	S <sub>2</sub> <sup>-</sup>	S	SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>2</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>

<b>Nombre</b>	Sulfuro	Azufre	Sulfito	Dióxido	Sulfato
---------------	---------	--------	---------	---------	---------

La reducción del sulfato a sulfuro requiere 8 electrones y, en las lagunas anaerobias, el acetato es la fuente de electrones. Esta reducción se realiza de acuerdo con la ecuación:



Esta reacción se realiza con el concurso de organismos sulfuroreductores como *Desulfuromonas acetoxidans* siendo el sulfuro de hidrógeno el producto final más abundante. La ausencia de luz impide la actividad de los organismos fototrofos y los quimiolitotrofos, que requieren condiciones con concentraciones muy bajas de oxígeno (microóxicas). Como resultado de esto, si la concentración de cualquier sulfato o el dador de electrones es muy alta, entonces se produce ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), con olor a huevos podridos. La evolución del sulfuro de hidrógeno es responsable de los olores relacionados con las lagunas anaerobias. Este es fácilmente eliminado, haciendo que la concentración de sulfato del influente esté por debajo de 500 mg/l y que el influente orgánico esté a una concentración menor de 400 mg DBO<sub>5</sub>/L.

## 1.51. Biología de las lagunas

Como ya se ha indicado, los verdaderos protagonistas de la degradación de la materia orgánica, son los microorganismos, siendo los más característicos en los procesos de tratamiento: bacterias, algas, hongos, protozoos, rotíferos y crustáceos.

Al grupo de protistas inferiores pertenecen las bacterias y las algas azul-verdes. Al de protistas superiores las algas, los hongos y los protozoos y como miembros más representativos del reino animal, los rotíferos y crustáceos.

Recuérdese que una laguna es un ecosistema en el que existe una parte abiótica (factores físicos y químicos que constituyen el medio) y una componente biótica (organismos productores, consumidores y descomponedores), existiendo una relación entre ambas y en los organismos entre sí, siendo la composición de la aguas residuales la que determina el tipo de microorganismos que se van a desarrollar en las lagunas.

Por eso, la población de las bacterias varía a lo largo de un sistema de lagunaje, ya que se van modificando constantemente las condiciones del medio.

El proceso de depuración se produce, principalmente, por la interacción simultánea de dos mecanismos: por una parte, la sedimentación y por otra la acción de las bacterias que actúan tanto en la masa del agua como en los sedimentos. Las fases biológicas del tratamiento se establecen gracias al desarrollo, en el medio, de ecosistemas en los que intervienen las algas, los hongos, los protozoos, microcrustáceos, etc., que completan cadenas tróficas hasta niveles relativamente altos de estructuración.

### 1.51.1. Bacterias

Las bacterias juegan un papel fundamental en los ciclos naturales del carbono, el fósforo y el nitrógeno, ya que por acción metabólica, las bacterias llevan a cabo

una mineralización de la materia orgánica, aunque no toda la que está presente es fácilmente biodegradable. Un parte de ésta precipitará para formar parte de los sedimentos, otra permanecerá disuelta, inalterada, y otra se biodegradará generando otros compuestos menos energéticos, anhídrido carbónico y agua.

Las sustancias solubles presentes en el agua proporcionan el sustento a las bacterias. Estas materias son degradadas para proporcionar alimento, incorporando sus elementos a la propia masa viva de estos microorganismos. Durante el desarrollo de este proceso, llevado a cabo por microorganismos aerobios, se requiere la presencia de oxígeno disuelto en la masa líquida. Estas condiciones de oxigenación son posibles gracias a la existencia de pequeñas algas microscópicas que realizan funciones fotosintéticas, ya que de otra manera la materia orgánica presente en el agua no podría reducirse, teniendo en cuenta que en un agua residual este valor alcanza fácilmente los 300 mg/l de DBO<sub>5</sub> y el agua saturada sólo admite, como máximo, dependiendo de la temperatura, 15 mg/l de oxígeno disuelto. Esta característica permite llevar a cabo el proceso sin necesidad de introducir oxígeno por otras vías, como por ejemplo, la agitación mecánica. Además del oxígeno proporcionado por estos microorganismos, existe una aireación natural debida a la mezcla de corrientes de distintas densidades provocada por el calentamiento de las aguas.

En general, el sistema de lagunaje suele realizar la depuración en tres fases, asociadas cada una a un tipo específico de lagunas. Estas etapas comprenden un proceso de acción anaerobia, otro facultativo y otro de maduración.

Son muy pocas las bacterias que no se han encontrado en una laguna de estabilización. Es éstas, las poblaciones bacterianas están muy influenciadas por las condiciones del medio. Variará, en una sucesión de lagunas (lagunaje), a lo largo de las mismas y, según sea la calidad del agua (DBO<sub>5</sub>, DQO, sólidos en suspensión, oxígeno disuelto, pH, temperatura, etc.), así serán las especies dominantes y su tolerancia a los factores del medio. En la misma línea se encuentra la desaparición de distintas especies, ya que, a la resistencia de distintas condiciones del medio, se unen fenómenos de depredación o presencia de sustancias tóxicas.

Anteriormente se han estudiado los distintos tipos de bacterias que se pueden encontrar en un sistema de depuración en general y por supuesto en las lagunas. Bacterias formadoras de ácidos, metanogénicas, sulforreductoras, sulfobacterias púrpura, nitrificantes, denitrificantes, etc., son algunas de las colonias bacterianas que se encuentran en los distintos tipos de lagunas. Las especies dominantes, como es lógico, tienen un margen de tolerancia más amplio a los factores que las controlan (pH, temperatura, oxígeno disuelto, etc.) que las que se encuentran en recesión.

Las bacterias patógenas (*Salmonella*, *Shigella*, *E. Coli*, etc.), que, como se ha visto, no son capaces de multiplicarse y sobrevivir mucho tiempo en medio acuático aeróbico, desaparecen debido a los procesos de sedimentación, competencia, depredación, inanición, etc.

En relación con las bacterias nitrificantes, aparecen, por lo general, en pequeñas cantidades, tanto en las lagunas aerobias como en las facultativas.

En las lagunas aerobias y de maduración se mantienen las condiciones aerobias en toda la masa de agua, siendo su principal fuente de oxígeno la fotosíntesis de las algas. En las lagunas de maduración, se reduce el proceso bacteriano,

umentando la proliferación de algas, las cuales contribuyen, en un altísimo porcentaje, al mantenimiento de las condiciones aerobias.

En las facultativas, en la zona aerobia, se realizan en la capa superior de la misma, fundamentalmente, funciones de digestión aerobia, en la capa intermedia se encuentran bacterias facultativas, que pueden ser aerobias por el día y anaerobias por la noche.

En las anaeróbicas, en el fondo, en donde se depositan los fangos, en ausencia de la luz, se encuentran las bacterias anaerobias estrictas.

Los gérmenes patógenos, microbios, virus, protozoos, etc., como consecuencia de su transferencia a un medio hostil, desaparecen, ya que dichos microorganismos se encuentran sometidos a la radiación solar y en particular, a los rayos ultravioleta, a la acción de las bacterias mejor adaptadas que aprovechan los nutrientes presentes en el medio e incluso se sirven de ellos para alimentarse, a los altos valores de pH como consecuencia de la función clorofílica, etc.

### *1.51.2. Hongos*

No está muy claro su papel en la estabilización de la materia orgánica en una laguna. Se cree que bajo determinadas condiciones ambientales pueden ejercer un papel importante, ya que a pH bajos predominan sobre las bacterias, cuando hay déficit de nitrógeno o es pequeña la concentración de oxígeno disuelto.

Hay constancia de que se desarrollan en las lagunas, apareciendo hongos filamentosos en el fondo y en las espumas que se encuentran flotando en la superficie.

### *1.51.3. Fitoplancton*

Las algas presentes en las aguas dulces constituyen el denominado fitoplancton, siendo la principal característica de las comunidades fitoplanctónicas la coexistencia, en el mismo hábitat, de numerosas poblaciones de distintas especies, a pesar de que cada especie tiene unas necesidades fisiológicas y ambientales diferentes. Para que una especie se haga dominante, es necesario que las condiciones del medio se mantengan, sin variación, durante un periodo de tiempo suficientemente grande.

El papel que juegan las algas en las lagunas de estabilización es muy importante, ya que, mediante la fotosíntesis, aportan al medio el oxígeno necesario para que se produzca la biodegradación de la materia orgánica y permitiendo la vida de otros organismos.

Las bacterias transforman la materia orgánica presente en el agua en productos sencillos, susceptibles de ser utilizados por las algas. A su vez, éstas, mediante la fotosíntesis, transforman dichos compuestos en materia orgánica celular con producción de oxígeno. Como resultado, se produce una proliferación de algas en las lagunas, que las hace tomar un color característico que varía en función de las algas dominantes.

A veces aparece en las lagunas un exceso de algas. Este fenómeno designado con la palabra inglesa "bloom", que podría traducirse por "floreCIMIENTO" o "auge", se define como "la aparición repentina de un gran número de algas microscópicas pertenecientes, sobre todo, al grupo de las Cyanophyceas



(Verde-azuladas), aunque también puede ser originado por algas rojas o pardas, siendo más abundantes en los meses calurosos, donde las condiciones son más favorables. También puede definirse el "bloom" como "el crecimiento de, normalmente, pocas especies que puedan visualizarse fácilmente por una coloración verde o parda del agua. Estos crecimientos masivos pueden conferir al agua un olor desagradable y un color característico".

Cuando entre los nutrientes escasea el nitrógeno, aparecen las algas capaces de fijar el que se encuentra en la atmósfera, tales como la cianofíceas *Anabaena*, *Nostoc*, *Oscillatoria*, etc.

El fitoplancton es controlado por factores físicos (Temperatura, luz solar, turbulencia, etc.) los cuales contribuyen a mantener unas condiciones óptimas de desarrollo, ya que por ejemplo, no todas las algas tienen la misma eficacia para la conversión de la energía lumínica, por lo que se establece en la laguna una distribución vertical de las algas, según las necesidades de luz.

Por otra parte, la proliferación del fitoplancton limita la zona eutrófica al hacerse sombra unas especies a otras.

No todas las algas tienen las mismas necesidades de nutrientes: esta diferencia es la que determina la composición de las comunidades que pueblan las aguas con distinto grado de eutrofia.

En relación con el antagonismo entre los organismos, las algas descargan en el medio acuoso donde se encuentran, productos de su metabolismo (metabolitos), que pueden tener una acción inhibitoria o favorecedora del crecimiento, según la concentración en que se encuentren en el medio. Fuertes concentraciones de estas sustancias bloquean la mitosis, y como consecuencia, inhiben la reproducción, mientras que contenidos débiles afectan a su nutrición. Así, en la proliferación excesiva de una especie fitoplanctónica, aumenta la concentración de sus excreciones, lo que tienen como efecto el eliminar otras especies (heteroantagonismo) hasta un punto tal en que las mismas se autolimitan (autoantagonismo).

Otra acción de los factores indirectos es la predación. En efecto, como se sabe, el fitoplancton constituye el primer eslabón de la cadena alimentaria, siendo consumido por los predadores o productores secundarios, organismos filtradores como los rotíferos, copépodos, cladóceros y algunos ciliados. Debido a esta acción, cuando aumentan extraordinariamente estos organismos filtradores, un cierto número de organismos fitoplactónicos desaparecen en la laguna. Este fenómeno puede ser la causa de la disminución de la concentración de oxígeno en el agua de una laguna.

También puede ser la causa de la disminución de fitoplancton en un lagunaje la presencia de metales pesados en las aguas residuales que llegan al mismo, ya que sus sales actúan como veneno (sales de cobre, aluminio, etc.).

#### *1.51.4. Zooplancton*

Se denomina zooplancton "al conjunto de los organismos animales que viven en el seno de las aguas libres". Entre los grupos más importantes que forman parte de las aguas dulces se encuentran los protozoos (su presencia indica un efluente poco degradado), rotíferos (como depredadores, controlan los niveles de población de formas más inferiores presentes en una laguna: fitoplancton y

bacterias, influyendo en la sucesión de especies dominantes), cladóceros (organismos filtradores que se alimentan de algas y favorecen la floculación y sedimentación de la materia orgánica en suspensión) y copépodos (que se alimentan esencialmente de fitoplancton y bacterias y su presencia es signo de una depuración más avanzada, por lo que aparecen exclusivamente en la últimas lagunas de un lagunaje).

El zooplancton favorece los objetivos fundamentales que se desean alcanzar en una laguna de estabilización: disipar una parte de la energía y transformar la restante en energía disponible para poder ser utilizada en el escalón siguiente de la cadena trófica, constituyendo un eslabón es la transferencia de energía desde los productores primarios (fitoplancton) hasta los consumidores secundarios (peces), que lo utilizan como alimento, al menos durante las primeras fases de su vida.

Por otra parte, el zooplancton actúa controlando el fitoplancton de las aguas residuales, ya que contribuye a clarificarla, debido a que, al alimentarse de algas, eliminan parte de ellas y favorece el desarrollo de las restantes, las cuales tienen mayor disponibilidad de luz debido a que desaparece el efecto sombra y por tanto tiene mayor actividad fotosintética. Por el contrario, ocurre que, la actividad de los organismos zooplanctónicos favorece el desarrollo de un determinado tipo de algas, debido a que, al consumir selectivamente una determinada especie, reducen la competencia a favor de otras.

La calidad del fitoplancton afecta también a la concentración del zooplancton, ya que, según el tipo de algas que se desarrolle, aparecen unas poblaciones u otras.

Muchas especies son filtradoras, no selectivas (rotíferos, cladóceros), capaces de ingerir, además de células vivas, partículas en suspensión que tengan tamaño adecuado a su aparato filtrador.

Por lo general, los factores que más influyen en el desarrollo del zooplancton, son la disponibilidad de alimento y la temperatura.

En relación con el alimento, su principal fuente es el fitoplancton, siendo la concentración de ésta una función de la concentración de nutrientes, es especial de fósforo como factor limitante.

La comunidad zooplanctónica también puede verse afectada por la acción de compuestos tóxicos. Estos pueden ser vehiculados por las propias aguas residuales, o generarse en el interior de la propia laguna.

## 1.52. Diseño de lagunas

Se advierte, una vez más, que o se pretende hacer una exposición detallada del diseño de los distintos tipos de lagunas. Únicamente se indican algunas normas, para ayudar al conocimiento de las mismas y que el operador pueda profundizar en las circunstancias que rodean el lagunaje del que es responsable, para que su funcionamiento sea lo más correcto posible.

El diseño de lagunas no ha podido ser desarrollado racionalmente, debido a la naturaleza de las aguas residuales urbanas que se pretenden depurar y a la complejidad de las reacciones biológicas que se desarrollan en las mismas, por lo que el mismo se basa en métodos empíricos, en situaciones climáticas propias de la zona donde se va a instalar el lagunaje, apoyados en el conocimiento de

determinadas magnitudes físicas y biológicas. Esta empiricidad hace que los valores que se obtienen, en cada caso, varíen mucho de unos procedimientos a otros, soliendo adoptarse los valores que ofrecen mayor tiempo de retención o el mayor volumen de la laguna. De aquí que su dimensionado se base, principalmente en las condiciones climáticas.

### *1.52.1. Antecedentes históricos de las lagunas y su diseño*

Aunque desde tiempos inmemoriales se ha utilizado el almacenamiento de las aguas residuales urbanas para su depuración natural, hasta principios de siglo no se inicia el proceso de una manera científica. Es en San Antonio de Texas en 1901 donde se realizó una de las primeras experiencias (275 Ha y una profundidad media de 1.4 metros). El éxito de esta experiencia hizo que la imitaran en otras ciudades de Texas, California, Dakota del Norte, etc.

En Europa se registran experiencias muy similares alrededor de los años 20 (Imhoff, 1926).

La construcción de las primeras lagunas fue causa del azar, por lo que hubo varias instalaciones que resultaron deficientes, ya que no tenían en cuenta la forma de la laguna, la carga orgánica ni el tiempo de permanencia.

Parece ser que, la primera vez que se diseñó racionalmente un sistema de lagunas para la depuración de las aguas negras, fue en Dakota del Norte en 1948 y en 1960 ya se habían construido más de 100 en éste Estado.

Después de las experiencias desarrollada (1945-1950) se afrontó el problema de establecer un criterio racional para su diseño, empezando a aparecer en la literatura científica datos y propuestas a partir de 1950. Además de en los Estados Unidos, se iniciaron investigaciones similares en distintas naciones: Australia (Parker, 1962); Brasil (Philipovsky, 1961); Canadá (Fisher et al., 1966); Colombia (Ortega, 1967); Costa Rica (Saenz, F., 1965); India (Cpheri, 1964); Israel (Wachs et al., 1961); Nueva Zelanda (Collom, 1965); Sud África (Shaw, 1962); Alaska y Canadá (Reid, 1965) (Pattison, 1964), etc.

Como consecuencia de las investigaciones realizadas, han aparecido en los últimos años diferentes propuestas para el diseño de lagunas, siempre basadas en las experiencias de laboratorio y de campo de cada investigador, en relación con la carga orgánica de las aguas residuales a depurar y el tiempo de retención.

### *1.52.2. Características a considerar*

En la realización de un proyecto de lagunaje influirá, tanto las limitaciones que pueden surgir en su ejecución y funcionamiento, como en las características más importantes, necesarias para alcanzar el objetivo propuesto: la estabilización de la materia orgánica que llevan las aguas residuales a depurar. Estas características son:

- Características de la población
  - (1) Población actual
  - (2) Población prevista a medio y largo plazo
  - (3) Agua de abastecimiento: Consumo medio
- Aguas residuales a depurar

- (1) Caudal de las aguas residuales y sus variaciones horarias, diarias y mensuales
- (2) Características de las aguas residuales: aguas residuales urbanas, aguas residuales industriales, aguas residuales mixtas y en éstas últimas, porcentajes que las componen
- (3) Volumen de aguas residuales: máximo y mínimo diario, mensual y anual
- (4) Distancia de la población al sitio de emplazamiento del lagunaje. Posible producción de malos olores.
- (5) Carga orgánica (DBO<sub>5</sub> y DQO) en relación con los caudales. Variaciones y medias.
- (6) Sólidos en general (disueltos, en suspensión, fijos, volátiles, etc.), principalmente los sólidos en suspensión y de éstos, los sedimentables.
- (7) Nutrientes: nitrógenos (nitrógeno total, nitratos, nitritos, amonio) y fósforo.
- (8) pH, máximo, medio y mínimo: variaciones
- (9) Características hidrológicas de la zona
  - (a) pluviometría: medias mensuales y anuales
  - (b) evaporación: medias mensuales y anuales
  - (c) horas de luz solar: sus variaciones
  - (d) presencia de nubes y su variación estacional
  - (e) temperatura del aire y del agua: variaciones estacionales
  - (f) régimen de vientos
  - (g) hidrogeología de la zona
- (10) características topográficas del suelo
  - (a) Facilidad de excavación, compactación, permeabilidad de los terrenos donde se va a construir el lagunaje
  - (b) Curvas de nivel
  - (c) Perímetro de protección del conjunto de las lagunas que van a formar el lagunaje.
- (11) Reglamentación en relación con las poblaciones locales
  - (a) Quiénes son los propietarios de los terrenos que se necesitan
  - (b) Origen de las aguas de abastecimiento
  - (c) Alcantarillado
- (12) Reglamentación hidráulica
  - (a) Calidad de las aguas de los cauces públicos (objetivos de calidad)
  - (b) Facilidad de vertido de las aguas depuradas (% de depuración)
- (13) Posible reutilización de las aguas depuradas

- (a) Contribución de las aguas depuradas al caudal del cauce receptor
- (b) Posible recarga de acuíferos subterráneos
- (c) Posible uso industrial
- (d) Riesgos
- (e) Facilidad de extracción de los sedimentos de las lagunas

El primer paso a dar, en la elección del emplazamiento de las distintas lagunas que formarán el lagunaje, se hace teniendo en cuenta los puntos de vista y las características enunciadas anteriormente. Además hay que tener en cuenta la forma de las lagunas, la máxima adaptación al terreno, la situación de las entradas y salidas, etc. Todo ello debe ir dirigido a lograr un funcionamiento correcto, que permita alcanzar los objetivos propuestos.

### *1.52.3. Variables que intervienen en el diseño*

Las variables que intervienen en el dimensionado de un lagunaje, son varias:

Unas son propias de las aguas residuales

- Concentración de la materia orgánica presente (DBO<sub>5</sub>, DQO)
- Temperatura
- Concentración de microorganismos (coliformes)
- pH
- Presencia de nutrientes (N<sub>2</sub> y P)
- Presencia de venenos para los microorganismos
- Relación DBO<sub>5</sub>/N/P

Otras dependen de las condiciones climatológicas del lugar donde se va a construir el lagunaje

- Temperatura del ambiente
- Horas del sol
- Nubosidad
- Régimen de vientos

Otras, en fin, dependen del diseño

- Geometría
- Tiempo de retención hidráulica
- Carga superficial
- Punto de entrada y salida del agua residual

Esta complejidad de factores avala lo citado anteriormente de que es imposible abarcar, en un modelo matemático, todos los factores (físicos, químicos, biológicos, hidrológicos) que intervienen en la biodegradación y estabilización de la materia orgánica, a fin de que reflejen la influencia que los mismos tienen en el comportamiento de una laguna. De aquí el que los criterios de diseño sean totalmente empíricos.

### *1.52.4. Carga orgánica*

La concentración de la materia orgánica determinada por la DBO<sub>5</sub> y la DQO viene dada por las expresiones siguientes:

- Carga superficial  $C_{sup}$ : es un factor biológico que indica la carga orgánica que recibe una laguna. Se suele expresar en Kg DBO<sub>5</sub>/Ha · día
- Carga orgánica  $C_0$ : es la carga orgánica que entra en una laguna. Se suele expresar en g · DBO<sub>5</sub> /hab · día
- Carga volúmica  $C_v$  : es la carga que entra por volumen en una laguna y se expresa en g · DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>·día o bien en mg DBO<sub>5</sub>/L · día
- Carga afluente  $C_e$ : se utiliza para determinados cálculos de diseño y es la concentración de DBO<sub>5</sub> que entra en la laguna. Se expresa en mg/L de DBO<sub>5</sub>.
- Carga efluente  $C_{sal}$ : concentración de DBO<sub>5</sub> en el agua de salida de la laguna. Se expresa en mg/L de DBO<sub>5</sub>.

En relación con la carga superficial, en la siguiente tabla se presentan los valores que en la literatura científica se asignan para los diferentes tipos de lagunas.

**Tabla 7.** Estimación de la  $C_{sup}$  de diferentes tipos de lagunas

<b>Tipo de laguna</b>	<b>Carga orgánica superficial Kg DBO<sub>5</sub>/Ha · día</b>
Anaerobia	225-1120
Aerobia	70-225
Facultativa	20-35
Maduración	6-20

Ahora bien, estos valores varían según los autores, ya que los mismos se obtienen por la experimentación y las condiciones varían de un experimento a otro.

Si en lugar de la carga orgánica superficial se contempla la carga orgánica volumétrica  $C_v$  (g DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup> · día, o mg DBO<sub>5</sub>/L · día) los valores recopilados por Solis se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 8.** *Carga orgánica volumétrica recomendada, g DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup> · día*

<b>Autor</b>	<b>Carga orgánica volumétrica</b>
Bradley y Senra	40-250
Ministerio Salud Israel	125
Mara	400
Fisher et al	42-283

La selección de estos parámetros se hace teniendo en cuenta la radiación solar, las temperaturas media y mínima del aire, el régimen de vientos, características de las aguas, nutrientes, etc.

#### *1.52.5. Tiempo medio de retención*

Tiempo medio de retención hidráulica, es "el tiempo que permanece el agua residual a depurar en la laguna". Su valor debe ser el necesario para que se realice el grado de estabilización deseada de la materia orgánica y la eliminación de los microorganismos patógenos.

$$t = V / Q = p \cdot l \cdot a / Q \quad (42)$$

V = volumen total de la laguna

Q = caudal de diseño

P = profundidad de la laguna

L = longitud de la laguna

A = anchura de la laguna

# **CAPÍTULO 7: DEPURACIÓN ECOLÓGICA (DEPURECO)**

En la línea de buscar e investigar soluciones para la depuración y el tratamiento de las aguas que se basen en el conocimiento ecológico de los procesos naturales que se desarrollan en el medio ambiente, se encuentra la laguna de aireación natural en cascada o Depuradora Ecológica (DEPURECO) basada en potencia la autodepuración que se desarrolla en los ríos, mediante la aireación natural en cascada de las aguas residuales urbanas y/o industriales con materias orgánica biodegradables. El estudio de su acción depuradora está basado en la recuperación natural de los ríos mediante la autodepuración. Por sus características también puede ser considerada como un lagunaje de aireación natural en cascada.

Consta en esencia de varios reactores en serie, situados en cascada, que facilitan y fomentan la aireación natural. Sin perjuicio de mantener y desarrollar el aporte de oxígeno autotrófico, se aumenta el tiempo de contacto del oxígeno disuelto en las cascadas con el agua a depurar, a fin de facilitar y acelerar la acción de los microorganismos en la biodegradación de la materia orgánica. Esto hace que se potencien las características autodepuradoras que tienen los ríos.

El tiempo de contacto del agua residual con el oxígeno disuelto se facilita y aumenta haciéndola circular a través del fondo de cada reactor, de tal suerte que se propicia el satisfacer la demanda inmediata de oxígeno y logrando, al llegar a la siguiente cascada del reactor, que la concentración de oxígeno disuelto sea la mínima posible y por lo tanto la disolución del oxígeno sea mayor y más rápida.



Esto hace que se aumente teóricamente la longitud equivalente a un río en sus acciones de autodepuración.

Por otra parte, según sean las características del agua residual a depurar (demanda inmediata de oxígeno, carga contaminante, sólidos en suspensión, etc.) y del cauce receptor del agua estabilizada (objetivos de calidad del agua del cauce receptor, utilización futura del agua, distancia del vertido a la toma próxima, etc.) así serán los parámetros de diseño de la depuradora ecológica, en especial el tiempo de permanencia del agua residual a depurar en los reactores, número de cascadas, etc., lo que traerá como consecuencia, entre otras acciones favorables a la biodegradación de la materia orgánica, el regular la velocidad de la corriente de agua residual con la consiguiente influencia en la sedimentación de los sólidos en suspensión.

De acuerdo con la situación de las pantallas que hacen circular el agua por el fondo del reactor, disminuyendo o aumentando la velocidad ascensional, se facilitará la sedimentación de las partículas en suspensión, depositándose en mayor proporción en los reactores que se desee. Esto traerá como consecuencia que en estos reactores, en el fondo, se realizarán con mayor intensidad las reacciones anaerobias, reacciones que tendrán como consecuencia, por un lado, biodegradar la materia orgánica y por otro, poner en disolución, por hidrólisis, muchas sustancias orgánicas que se encontraban en suspensión.

## 1.53. DEPURECO Vs autodepuración

Basándose en lo anterior, para conocer en profundidad los procesos que se realizan en la depuradora ecológica hay que fijarse en los que se desarrollan en un río. En adelante se designará como "sistema" tanto un río como la depuradora ecológica.

Anteriormente se han estudiado los procesos de autodepuración los cuales se desarrollan igualmente en la laguna de aireación natural en cascada o depuradora ecológica (DEPURECO).

En efecto, la autodepuración se relaciona con la composición química del agua y de los sedimentos de un río. El término "depuración" significa la eliminación o capacidad de eliminación de las sustancias disueltas o en suspensión presentes en un agua contaminada.

La palabra capacidad se entiende normalmente como una habilidad para eliminar una cierta cantidad de polución. Lo normal es que se acepte que estará agotada la capacidad cuando, por ejemplo, aparezca en el agua una cantidad mínima de oxígeno disuelto o comience a desarrollarse una determinada asociación de organismos. Es obvio, no obstante, que el término "capacidad de autodepuración" es aplicable solamente cuando ha empezado a darse algunas de las condiciones límites que se hayan definido previamente, tanto químicas como biológicas.

Teniendo en cuenta que los componentes químicos del agua y de los sedimentos son factores ecológicos adecuados para el desarrollo de las asociaciones de organismos en cualquier punto del sistema, (provocándose efectos secundarios: gradientes biológicos, de concentración de oxígeno, etc.), la base de la depuración en cada reactor de la Depuradora Ecológica será la razón de la

actividad, entre el oxígeno disuelto en el agua (procedencia física y fotosintética) y la respiración de la comunidad.

Es posible comparar la autodepuración en un tramo de un río con la depuradora ecológica debido a que un río puede ser considerado como un sistema de fermentación continuo en flujo cerrado en el cual, parte de la biomasa está en suspensión libre y parte está fija en el fondo (biomasa epibéntica) o vive en los sedimentos (biomasa béntica), los mismo que se realiza en la depuradora ecológica.

Siguiendo a Wuhrmann, se puede escribir que las propiedades dominantes del sistema biológico existentes en un río (aplicable a la depuradora ecológica), son:

- El "sistema" puede ser considerado como un conjunto simple de reacciones, y el estado de la depuración en un punto determinado del mismo, representa grados de desarrollo del proceso, siendo el mismo una función del tiempo de permanencia (tiempo de flujo) desde el punto considerado al siguiente.
- Cada tramo del "sistema" o reactor, de volumen adecuado, puede ser considerado como un conjunto individual, en el cual se puede considerar que es uniforme la calidad del agua. La biocenosis se encontrará en un estado de "equilibrio" con las condiciones ecológicas características para el tramo o reactor determinado.
- Para lograr mantener el nivel de concentración de organismos en la masa de agua de un determinado punto del "sistema", son esenciales aportes continuos de biomasa.

Los dos primeros puntos presuponen condiciones constantes de alimentación, cualitativa y cuantitativamente, así como una razón constante de dilución del sistema. En la naturaleza no se produce ninguna de estas condiciones, ya que la calidad biológica de las aguas residuales varían en el sistema, de acuerdo con el cambio de las condiciones externas, tales como variación del caudal, de la carga contaminante, influencias de las estaciones del año, etc.

En relación con la mezcla, las cascadas contribuyen a la mezcla de las aguas residuales, ya que si el paso a través de un reactor es un movimiento laminar, en las cascadas (batientes) se produce turbulencia.

La mezcla se produce principalmente como consecuencia de la difusión por remolinos, gradientes de densidad debido a la temperatura, sales disueltas, etc. Las cascadas de la depuradora ecológica facilitan el transporte y la mezcla.

Respecto a los sólidos en suspensión, la capacidad de transporte de las aguas residuales para los mismos puede considerarse que es proporcional a la velocidad cuando ésta es baja y al cuadrado de la velocidad cuando supera los 12 cm/seg.

La sedimentación elimina los sólidos en suspensión presentes en las aguas residuales, los cuales pueden retener por sorción iones o moléculas, los cuales son eliminados (material soluble) de la columna de agua. Los posibles iones tóxicos presentes en las aguas residuales, adsorbidos por las partículas en suspensión o en disolución, pueden afectar al alimento de los microorganismos.

Los sólidos sedimentados afectan a la biota béntica, dependiendo de la naturaleza y cantidad de los mismos, pudiendo servir como alimento, acelerando el crecimiento de la fauna bentónica, o como sepulcro de la misma.

La resuspensión del sedimento puede tener efectos sobre las propiedades de la columna de agua, ya que la materia orgánica insoluble, debido a la hidrólisis y descomposición por anaerobiosis de los sólidos sedimentados, ponen en disolución materia orgánica insoluble, aumentando la DBO disuelta y, por tanto, la demanda de oxígeno. A una cierta distancia de la entrada de las aguas residuales en la depuradora ecológica hay un reactor donde existe equilibrio en relación con la sedimentación, un punto donde la DBO sedimentada, por unidad de tiempo, es igual a la cantidad biodegradada. Si el diseño de depuradora ecológica es el apropiado, se puede conseguir la sedimentación de casi todos los sólidos en suspensión, acelerando el proceso de sedimentación. Para ello se debe diseñar, entre los reactores 3 y 6, una trampa para los sólidos en suspensión que les obligue a sedimentar. Muchos de estos sólidos, sufrirán, a su vez, la hidrólisis, por lo que esta zona de depuradora ecológica hará la función del "estómago" de la misma.

## 1.54. Degradación de contaminantes.

Estos factores son:

- Tipo y cantidad de la biomasa que constantemente está metabolizando contaminantes que se encuentran en el agua
- Geometría del biotopo, es decir, la distribución espacial de la biomasa en la sección transversal del sistema, que es fija
- Tiempo de contacto entre la biomasa y el agua
- Tipo y concentración de los compuestos que se desea sean eliminados
- Temperatura
- pH
- Tensión de vapor del oxígeno disuelto en el agua

Otros factores adicionales como luz incidente, composición inorgánica del agua, velocidad de flujo, etc., pueden afectar al crecimiento de los microorganismos y al metabolismo de la biocenosis del sistema.

La distribución espacial de la biomasa, en la sección transversal y en el perfil longitudinal del sistema, se conoce como geometría de la biomasa. Este término quiere expresar o representar la superficie de organismos expuesta a la masa de agua fluyente, la cual influye en el transporte de partículas contaminantes a los organismos consumidores a los organismos consumidores. En la laguna de aireación natural en cascada (Depuradora ecológica) las microfotas heterótrofas que se encuentran como partículas en suspensión en el agua, dominan a la biomasa heterótrofa fijada en las paredes y en el fondo de los reactores, sobre todo a partir del cuarto reactor.

Por otra parte, la autodepuración, siendo una función de la cantidad de sustrato biodegradado y la velocidad de crecimiento de los microorganismos heterótrofos del río, depende de la temperatura como cualquier otra reacción bioquímica.

Ahora bien, aunque el incremento de la velocidad de reacción metabólica está en relación con el incremento de temperatura, sin embargo, esto no significa necesariamente que la autodepuración será mayor en verano que en invierno. En climas más fríos el caudal mínimo del río se suele corresponder con un mínimo en la estación fría, y las altas temperaturas del agua pueden aparecer, a veces, cuando los caudales de agua son altos. Las condiciones geométricas de la autodepuración son entonces más favorables en invierno que en verano y consecuentemente la autodepuración puede ser, en proporción, mucho mayor en invierno cuando la velocidad de las reacciones metabólicas de los organismos autodepuradores sea baja.

### 1.54.1. Unidades para medir la biodegradación

Los parámetros que se utilizan para el estudio de la depuración bacteriana son:

- Descenso de la masa celular o del número de bacterias por unidad de volumen
- Descenso de la masa celular o número de bacterias transportado por unidad de tiempo o distancia

Estos parámetros se basan, o sobre grupos definidos de microorganismos o en especies simples.

En relación con la carga contaminante, su disminución o "cantidad" de depuración  $V_c$  realizada en el sistema, entre dos puntos del mismo, viene dada por la ecuación:

$$V_c = Q (c_a - c_d) \text{ (Mol s}^{-1}\text{)} \quad (43)$$

La velocidad a que se realiza la depuración,  $V_r$  (descenso de la concentración de la carga contaminante por unidad de tiempo o distancia a caudal constante), se puede determinar por medio de la ecuación:

$$V_r = d_c / d_t = (c_a - c_d) / t \text{ (Mol m}^{-3} \text{ s}^{-1}\text{)} \quad (44)$$

La velocidad de eliminación específica ( $V_e$ ) puede expresarse como una función de la biomasa  $B$  del sistema. Se tiene:

$$V_e = V_c / B = [ Q (c_a - c_d) ] / [ t (b' P_v + b'' Q) ] \text{ (Mol g}^{-1} \text{ s}^{-1}\text{)} \quad (45)$$

Siendo  $B = b' P_v + b'' Q$

Expresando  $V_r$  como una función de la biomasa y de la superficie fija humedecida:

$$V_r = V_e (b' / R + b'') \text{ (Mol m}^{-3} \text{ s}^{-1}\text{)} \quad (46)$$

$V_e$  es equivalente a la velocidad de eliminación específica ejercida por la biomasa total  $B$ , que está en contacto directo con el agua fluyente (es decir, los organismos suspendidos más la fauna y flora epibebtónica asentada). Introduciendo en la ecuación (44) el radio hidráulico como un parámetro geométrico y el valor de  $V_e$ , se hace intervenir en  $V_r$  la distribución de espacio en la biomasa dentro de la sección transversal. Se tiene la ecuación (46)

Siendo:

$Q = \text{caudal (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$

$C_d, c_a$  = concentración de compuestos contaminantes. ( $DBO_5$ , sólidos en suspensión, etc.) aguas arriba ( $c_a$ ) y aguas abajo del sistema ( $c_d$ )

T = tiempo de paso entre los dos puntos en metros

B = biomasa total (gramos)

$B'$  = biomasa adherida ( $gr\ m^{-2}$ )

$B''$  = biomasa suspendida ( $gr\ m^{-2}$ )

P = longitud del perfil transversal humedecido (m)

R = radio hidráulico (m)

V = velocidad del agua ( $m \cdot s^{-1}$ )

Las cuatro ecuaciones se pueden aplicar a cualquier material o sustancia medida cuantitativamente que se considere sea un contaminante, indistintamente en unidades de peso o molaridades, número de organismos (bacterias) o unidades de energía.

De lo indicado anteriormente se deduce que las unidades descriptivas de los efectos secundarios de la depuración no son parámetros adecuados para la cuantificación de la misma ( $DBO$  del agua, concentración o transporte de oxígeno, tiempo de asociaciones de organismos, etc.)

Teniendo en cuenta la relación entre el balance de oxígeno y la biodegradación en el sistema, la concentración de oxígeno en el agua es uno de los factores ecológicos más importantes. Su variación produce en el sistema una cadena de reacciones sociológicas, cuyo grado depende de la duración y amplitud de los cambios de concentración de oxígeno, especialmente en relación con sus mínimos.

Esta concentración de oxígeno disuelto en las aguas del sistema, debe ser estudiada:

- Por su efecto sobre el metabolismo respiratorio de los organismos responsables de las reacciones primarias de autodepuración.
- Por su influencia sobre la composición de las especies de las comunidades epibentónicas del agua en el sistema

La concentración de oxígeno que se necesita en el ambiente externo de una célula de micrófitos aeróbicos, está bastante por debajo de 1 ppm para niveles de respiración ilimitados, y una pequeña fracción de éste valor satisface los requerimientos medios de concentración. Células dispersas en el espacio epibentónico de un río, encontrarán casi siempre estas pequeñas concentraciones. En el interior de una biocenosis, la cantidad de oxígeno consumida por un organismos está determinada por la rapidez con que es utilizado el oxígeno por el mismo y por su velocidad de transporte desde el medio externo, siendo la fuerza impulsora de este transporte el gradiente de concentración.

El lavado de los fondos de un río o reactor y la permanente disolución de los sedimentos por hidrólisis aumenta la oxidación microbiana de la materia orgánica en los sedimentos.

La concentración de oxígeno disuelto y la saturación del mismo en un tramo de un río depende en cualquier tiempo de:

- Ganancias de oxígeno
  - (1) Captación de la atmosfera
  - (2) Reaireación en condiciones de subsaturación
  - (3)  $K_2 (c_a - c_d)$ , cuando  $c_a > c_d$
  - (4) Producción de oxígeno fotosintético por el día (P)
- Pérdidas de oxígeno
  - (1) Respiración de los sustratos alóctonos en agua y sedimentos
  - (2) Respiración de sustratos autóctonos de producción foto y quimiosintética (Raut)
  - (3) Consumo de oxígeno por oxidaciones abióticas (ox)
  - (4) Desprendimiento de oxígeno a la atmósfera en condiciones de sobresaturación ( $K_2 (c_a - c_d)$ , cuando  $c_a < c_d$ )

En conclusión, es evidente que:

- El factor deudor del balance de oxígeno de un sistema, señala cualitativamente y de una forma bastante general, el estado de las reacciones de autodepuración que abarcan oxidaciones bioquímicas aerobias.
- Es imposible, por lo tanto, deducir de los perfiles de oxígeno cualquier dato cuantitativo concerniente a la cantidad de polución eliminada del agua. La razón principal es el hecho de que una porción desconocida y variable del sustrato reabsorbido es respirado por los organismos. Esta proporción depende del tipo de organismos, la clase y combinación de sustratos, la presión parcial de oxígeno, y posiblemente de otros factores ambientales.

La aparente facilidad de tratamiento matemático de la autodepuración de los ríos en términos de balance de oxígeno ha atraído a numerosos investigadores. Aunque la concentración de oxígeno es realmente un factor ecológico pertinente, no hay justificación para desatender los otros aspectos de la autodepuración o sus respectivos efectos ecológicos y mirar a la autodepuración solamente con el "ojo" del oxígeno. De hecho, la biocenosis del río y el metabolismo de sus miembros (ej. Autodepuración) están muchos más afectados por compuestos orgánicos e iones metálicos que por el oxígeno.

Además, aunque la concentración del oxígeno sea la adecuada, pueden existir diversos poluentes que no los indica la presencia de oxígeno. Por tanto, la protección de los ríos debe realizarse mediante la prevención de entrada de compuestos ecológicamente perjudiciales a los mismos y no imponiendo en ellos una capacidad de autodepuración que nunca tienen como arroyos limpios.

Los cambios diurnos de concentración de oxígeno en puntos aguas debajo de una descarga contaminante proporcionarán, en general, más datos sobre la autodepuración de la curva ponderada de oxígeno basada en los valores medios de oxígeno disuelto.

## 1.55. Línea del agua

Los procesos que se realizan en los distintos reactores de que consta una depuradora ecológica dependerán, como en cualquier otra depuradora, entre otros factores, del periodo de permanencia del agua en la misma, teniendo en cuenta de que en ésta depuradora ecológica se pretende se realicen los dos procesos: los de biodegradación de compuestos orgánicos disueltos y la hidrólisis de los sólidos insolubles orgánicos que se encuentran en suspensión. En esencia, este proceso es distinto del que se realiza en una depuradora de lodos activados, ya que en ésta lo que se hace es, por una parte, separa los sólidos en suspensión, y por otra, biodegradar, estabilizándolas, las materias orgánica disueltas mediante la proliferación de masa biológica con el consiguiente aumento de los sólidos a eliminar.

La variación de los caudales y de la carga orgánica que entran en la estación depuradora influirán notablemente en los procesos fisicoquímicos y biológicos que se desarrollan en la columna de agua en cada reactor del sistema.

El flujo hidráulico se verá afectado por el diseño de los reactores, el cual se debe realizar de tal suerte que se eliminen las zonas muertas, haciendo que se uniforme la dispersión de la materia orgánica.

El tiempo medio de retención en cada reactor dependerá únicamente de la variación de los caudales, siendo constante de un reactor a otro, a igualdad de caudal y de volumen.

Así como en las lagunas se produce un choque cuando aumenta la carga contaminante que llega a las mismas, en la depuradora ecológica se minimiza el mismo diseñando el volumen de los primeros reactores, de tal suerte, que se realice la admisión sin traumas para la marcha de la depuración. Por otra parte no se produce estratificación ni existen líneas preferenciales por donde discurre el agua residual dentro de la laguna, debido a la mezcla que se realiza en las distintas cascadas, unido a la imposibilidad de que se produzca estratificación térmica, debido a que las capas superficiales, más calientes, de acuerdo con el diseño de los reactores deben mezclarse con las capas inferiores en su caminar al reactor siguiente. No hay capas inferiores de agua residual estáticas, sino que las que en un momento se encuentran en la parte inferior pasan a estar en la superficie en un espacio de tiempo muy corto, homogeneizando su densidad. En viento influye poco en la homogeneización de las aguas en la depuradora ecológica.

## 1.56. Línea de los sólidos en suspensión

Los sólidos en suspensión se depositan en el fondo de los reactores, sedimentando, bien por gravedad los de tamaño adecuado, bien al neutralizarse las cargas eléctricas de las sustancias coloidales.

En el fono de los reactores, en los sedimentos, se desarrollan los procesos de fermentación anaerobia e hidrólisis, que tienen como consecuencia la ruptura de las largas cadenas orgánicas con la consiguiente aparición de otras unidades de cadena más corta, solubles y por tanto capaces de ser utilizadas por las bacterias. Esto hace que a veces determinados parámetros de control, aumenten en lugar de disminuir (feedback) a lo largo de distintos reactores (DQO, DBO<sub>5</sub>, amonio, etc.)

Merced a esta sedimentación, la concentración de los sólidos en suspensión disminuye a lo largo de los distintos reactores, facilitando la penetración de la luz en la masa de agua. Por otra parte, los sólidos en suspensión aportados por las aguas residuales crudas son fraccionados por percusión en cada cascada, sedimentando progresivamente en los primeros reactores, dependiendo de su diseño, ya que la velocidad del agua al pasar de uno a otro reactor tendrá una influencia decisiva en la sedimentación. Los fenómenos de adsorción y de coagulación de los coloides también tendrán efectos favorables para la sedimentación. En general, los sólidos se sedimentarán en gran parte en los primeros reactores, siendo en el "estómago" de la laguna donde encontrarán las condiciones más favorables. Los sólidos coloidales, no sedimentables, sobre todo las arcillas, precisan más tiempo para neutralizar las cargas (floculación, coagulación, etc.)

Además, en la sedimentación, se eliminarán por adsorción, muchas sustancias orgánicas y orgánicas (vivas o muertas) disueltas o en suspensión en el agua.

Los sólidos no sedimentables, coloidales, al precisar más tiempo para neutralizar sus cargas, sedimentarán en los últimos reactores e incluso, en algún caso, sobre todo los coloides inorgánicos, pueden ser eliminados con el efluente.

En otro orden de cosas, en los últimos reactores, cuando el agua ya se ha clarificado y pueden penetrar en profundidad con mayor facilidad los rayos solares, se formarán grandes cantidades de algas, que contribuirán a engrosar los sólidos en suspensión del efluente final, sobre todo en los meses donde mayor sea la temperatura, con mayores horas de sol.

La sedimentación proporciona un mecanismo adicional para la eliminación de parte de la materia orgánica biodegradable que se encuentra en forma de sólidos en suspensión. A causa del tiempo de retención de los sólidos en el fondo de los reactores, y de la degradación anaerobia citada, se produce la puesta en libertad de los productos gaseosos formados, entre otros amoníaco, metano, ácido sulfhídrico, etc., los cuales hacen que los lodos sedimentados sean removidos y algunos llevados a la superficie, ayudando a la mezcla de las aguas de los reactores. Por otra parte, contribuyen a la eliminación de la materia orgánica biodegradable. Como ya se ha citado, la energía utilizable de la Metanogénesis es baja, y consecuentemente, tiene una baja producción de células; aproximadamente el 70% de la  $DBO_5$  eliminada en el fondo de los reactores será en forma de metano.

La situación de los tabiques de separación, en cada reactor, influirá notablemente en la velocidad de paso del agua residual a depurar, ya que si la sección es pequeña aumentará la velocidad. Esto se puede utilizar para favorecer la sedimentación de los sólidos en suspensión, disminuyendo la velocidad ascensional. Por esto, en estos reactores, si están bien diseñados, no se producirán zonas muertas y se favorecerá el transporte de los sólidos en suspensión o su sedimentación, según interese. Igualmente será muy favorable la dispersión y no se producirán cortocircuitos: las aguas no circularán por líneas preferenciales.

El metabolismo anaerobio de los sedimentos de los reactores hace que no sea necesario, desde el punto de vista de los sólidos orgánicos, vaciar los reactores. Ahora bien, se debe contemplar la posibilidad, cuando se diseña una depuradora ecológica, de proveerle de facilidades para poder eliminar la arena, materiales



gruesos, flotantes, etc., así como la posibilidad de realizar reparaciones, lo cual se puede conseguir dejando sin servicio uno cualquiera de los reactores, haciendo que el agua a depurar pasa al reactor siguiente mediante un bypass. De esta manera se pueden realizar las operaciones que se necesitan sin necesidad de parar la depuradora.

## 1.57. Línea de oxígeno

La mayoría de lo escrito anteriormente en otros capítulos, sobre el oxígeno, es aplicable a la depuradora ecológica.

En relación con la línea del oxígeno hay diferencias fundamentales que se señalan a continuación.

- En la depuradora ecológica la mayor parte del oxígeno es aportado por difusión procedente del aire disuelto en las cascadas. A partir del 5º reactor, cuando la transparencia del agua es mayor, empieza a ser importante el oxígeno aportado por la fotosíntesis. En un agua residual el valor de la DBO<sub>5</sub> alcanza fácilmente 300 mg/l de O<sub>2</sub> y el agua saturada sólo admite, como máximo, dependiendo de la temperatura, 15 mg/L de oxígeno disuelto. La aireación natural en cascada permite llevar a cabo el proceso sin necesidad de introducir oxígeno por otras vías más costosas, ya que el oxígeno se aporta naturalmente a medida que se consume.
- El sedimento anaerobio que se forma en el fondo de los reactores es de poco espesor, ya que las pantallas de los reactores hace que el agua con oxígeno disuelto circule por encima de la misma. Su espesor vendrá dado por el parámetro de diseño correspondiente. Los gases que desprenderán agitarán estos sedimentos, y el oxígeno que se encuentra en su superficie oxidará compuestos como el sulfuro de hidrógeno, putrescina, etc., evitando la producción de malos olores. En ocasiones, sobre todo en primavera, en los reactores centrales podrán aparecer lodos flotantes, como consecuencia del desprendimiento de gases producidos en la fermentación anaerobia producida en los sedimentos depositados en el fondo, que serán sedimentados en los reactores siguientes.

Además, la línea del oxígeno es doble, considerando por una parte la demanda y por otra la producción.

La producción o el aporte de oxígeno para satisfacer la demanda tiene dos posibles orígenes:

- Oxígeno fotosintético producido por las plantas verdes, es especial las algas.
- La disolución del aire por difusión, lo que facilita y acrecienta por medio de las cascadas

En relación con la demanda, son tres las reacciones que la producen:

- Demanda bioquímica producida por las bacterias aerobias
- Demanda de la nitrificación
- Demanda béntica

## 1.58. Diseño y cálculo

### Diseño

Los elementos a tener en cuenta en el diseño y construcción de las depuradoras ecológicas son:

- Calidad del agua
- Carga orgánica de la misma
- Superficie disponible del terreno
- Topografía del mismo
- Temperaturas máximas y mínimas de la zona
- Utilización futura del agua
- Caudal del agua a depurar

De acuerdo con las disponibilidades y necesidades y para un buen funcionamiento de las depuradoras ecológicas, se deduce que son muy importantes la consideración de las variables siguientes:

- Pendiente de la laguna
- Número de reactores
- Volumen de la laguna
- Configuración de la lámina de las cascadas
- Anchura de los escalones
- Altura de los escalones
- Relación ancho-largo de la laguna
- Tiempo de retención hidráulica
- Estructura del salto
- Profundidad de los compartimentos
- Temperatura ambiente
- Temperatura del agua

### Cálculo

Si se considera un reactor de flujo continuo completamente mezclado, y se supone que las reacciones siguen la cinética de primer orden, la ecuación de funcionamiento se puede escribir:

$$V (dC / dt)_{\text{neto}} = Q C_0 - Q C_e - V (dC / dt)_{\text{reacción}} \quad (46)$$

Si se supone que para condiciones estables, la razón neta de cambio en la masa reactante es cero, la ecuación anterior se puede escribir:

$$0 = Q C_0 - Q C_e - VKC_e \quad (47)$$

$$(C_e / C_0) = 1 / [1 + K (V/Q)] \quad (48)$$

Ahora bien, si se tiene en cuenta el tiempo de retención hidráulica o tiempo de permanencia en el reactor de flujo continuo  $t$  que es  $t = V/Q$ , se tiene:

$$C_e / C_o = 1 / (1 + Kt) \quad (49)$$

El tiempo requerido para alcanzar la DBO<sub>5</sub> deseada será:

$$t = V/Q = 1 / K [(C_o/C_e)-1] \quad (50)$$

siendo :

$Q$  = caudal

$K$  = constante, cuyo valor va de 0.1 a 0.4 días

$C_o$  = DBO<sub>5</sub> de entrada. Concentración inicial de reactante influente

$C_e$  = DBO<sub>5</sub> de salida. Concentración final del reactante el fuente

$V$  = volumen del reactor

$t$  = tiempo de retención

Si el lugar de uno, es un sistema de dos reactores, de igual volumen, conectados en serie, y llamamos  $C_1$  y  $C_2$  la concentración del reactante a la salida de cada uno de los dos reactores respectivamente, se puede escribir:

Para el primero  $C_1 / C_o = 1 / (1 + Kt)$

Para el primero  $C_2/C_1 = 1 / (1 + Kt)$

$C_2 / C_o = C_1/C_o \cdot C_2 / C_1 = [1/(1 + Kt)]^2$

Si el sistema es de  $n$  reactores, siendo  $C_o$  la DBO<sub>5</sub> de entrada y  $C_n$  la DBO<sub>5</sub> de salida del reactor  $n$ , se tiene:

$$C_n/C_o = [1 / (1 + Kt)]^n \quad (51)$$

El tiempo de permanencia, para  $n$  reactores en serie, será:

$$n t = n/K [ (C_o/C_n)^{1/n}-1] \quad (52)$$

## 1.59. Ventajas de DEPURECO

Máxima fiabilidad

Coste nulo de mantenimiento en la mayoría de los casos

Gran facilidad de utilización y mantenimiento, ya que no necesita personal especializado

No produce olores cuando funciona correctamente

No consume energía

La superficie del terreno necesaria es de 50 200 veces menos, y aún más, que en las lagunas convencionales

La retención del agua es muchísimo menos que en las lagunas convencionales, ya que si en estas el tiempo de permanencia es de un mínimo de 15 días, en la depuradora ecológica es de 24 a 48 horas como máximo, dependiendo de diversos factores (diseño de la laguna, uno futuro del agua, carga contaminante, etc.)

# CAPÍTULO 8: ADSORCIÓN SOBRE CARBÓN ACTIVO

Como se ha citado en el apartado correspondiente, la adsorción es un fenómeno por el que las moléculas de un fluido que inciden sobre una superficie sólida quedan retenidas cierto tiempo sobre ella por acción física o química.

Para utilizar este fenómeno en el tratamiento de las aguas residuales se han de buscar materiales con gran porosidad y con una gran superficie específica, del orden de 500 a 1000 m<sup>2</sup>/g.

En principio, la adsorción se aplica a las siguientes áreas:

- Eliminación de cresoles
- Eliminación de fenoles
- Eliminación de hidrocarburos aromáticos
- Eliminación de derivados clorados
- Eliminación de olores
- Decoloración
- Eliminación de sabores desagradables
- Eliminación de detergentes
- Eliminación del carbono orgánico disuelto
- Eliminación de sustancias húmicas

Los adsorbentes más utilizados son la alúmina, gel de sílice y ciertas resinas orgánicas como el poliestireno o ésteres acrílicos, pero sobre todo el más aplicado es el carbón activo, tanto en polvo como en forma granulada.

La calidad de los efluentes de un sistema de adsorción por carbón activado, depende sobre todo de la composición del agua residual y del tipo de carbón activado que se utilice.

La adsorción la podemos realizar por dos vías: por contacto, a base de mezcla y agitación, o por percolación en columna.

En el primer caso, el adsorbente deberá estar pulverizado para que el contacto sea máximo.

En el segundo, el adsorbente deberá estar granulado, para poder percollar en una columna. En esta, solo es activa una parte, la zona de transferencia de materia, cuya longitud depende de la velocidad de flujo a través del adsorbente y de la velocidad del proceso. Llega un momento o punto de ruptura en que el adsorbente ya no es eficaz, a partir del cual ese adsorbente deberá ser regenerado.

## 1.60. Cinética

El fenómeno de la adsorción es una transferencia de una fase líquida que contiene el adsorbato, hacia una fase sólida, el adsorbente, el carbón activo, con retención de moléculas de los contaminantes del agua residual en la superficie del carbón activo, en un proceso de varias etapas.

- Primera etapa. Transferencia muy rápida de la partícula de la capa externa de hidratación hacia la interna.
- Segunda etapa. Desplazamiento rápido del agua ligada hasta contactar con el carbón activo
- Tercera etapa. Difusión lenta dentro del carbón activo bajo la influencia del gradiente de concentración.
- Cuarta etapa. Adsorción muy rápida en los microporos.

En la segunda etapa se determina el coeficiente de transferencia,  $K_f$ , que depende de las características del carbón activo, entre otros factores. Su valor aproximado es  $10^{-3}$  cm/seg. y aumenta a medida que el grano del carbón es más fino.

En la tercera etapa interviene el coeficiente de difusión  $D$ , de valor mínimo para ciertas macromoléculas y de valor máximo para los fenoles, y en ella se limita la velocidad de adsorción.

El carácter específico o no específico de los enlaces entre el adsorbato y el adsorbente, permite distinguir las fuerzas actuantes.

La adsorción no específica la provocan las fuerzas de van der Waals, que generan unos enlaces de poca energía. Se crean entre el soluto y la estructura cristalina hidrófoba del carbón activo. El fenómeno es reversible, y en ciertas condiciones se pueden desprender las moléculas que se han adherido al carbón activo. Por otra parte, la adsorción no específica es poco selectiva respecto a los solutos.

La adsorción específica hace que se puedan formar enlaces químicos con mucha más energía entre algunos compuestos ionizables y los grupos funcionales presentes en los bordes de los microcristales del carbón.

## 1.61. Cálculo

En principio, la adsorción es un equilibrio entre las moléculas del adsorbato que se han fijado en la superficie del adsorbente, y las que quedaron libres en la fase líquida.

La relación existente entre el equilibrio a una temperatura determinada entre la concentración del adsorbato en la fase líquida y la adsorbida en la superficie del adsorbente, es decir entre la concentración inicial de impurezas y la final, se

establece con una isoterma, curva con la que se pretende representar la capacidad adsorbente frente a la concentración de adsorbato.

Las isotermas de adsorción más conocidas son las de Freundlich, la de Langmuir y la de BET (Branauer, Emmett y Teller). Sólo trataremos las dos primeras.

La cantidad de impurezas que se adsorben se pueden calcular con la fórmula siguiente:

$$J = (C_0 - C) \cdot B \quad (52)$$

Siendo:

J: masa adsorbida de impurezas

C<sub>0</sub>: concentración inicial de impurezas

C: concentración final (en el equilibrio) de impurezas

B: volumen de la disolución

Con la isoterma se representa la variación de J/m, que es la cantidad adsorbida por unidad de masa de adsorbente, en función de C.

$$J/m = abC / (1+aC) \quad (53)$$

Donde:

m: masa de carbón activo utilizada

a, b: constantes

J/m: cantidad adsorbida por unidad de masa adsorbente

Si se invierte la ecuación quedará:

$$1/ (J/m) = 1/b + 1/abC \quad (54)$$

Que es una recta, con abcisa 1/C y ordenada 1/J/m.

En cuanto a la isoterma de adsorción de Freundlich, su ecuación es  $J/m = KC^{1/n}$ , siendo:

K, n: constantes específicas del carbón activo para cada caso y para cada temperatura

Si expresamos la ecuación en su forma logarítmica:

$$\text{Log } J/m = \text{logK} + 1/n \text{ logC} \quad (55)$$

Que es una recta, con abcisa log C y ordenada log J/m

## 1.62. Textura y propiedades superficiales

Llamamos carbón activo a un carbón con propiedades notables de adsorción como consecuencia de su gran porosidad.

Existen dos tipos de carbón activo: el carbón activo en polvo, que se utiliza fundamentalmente en depuración de líquidos y el carbón activo granular, que se suele emplear con frecuencia para la adsorción de impurezas de gases y vapores.

Las materias primas para la obtención del carbón activo son diversas, siendo las más frecuentes:

- Cok

- Hulla
- Lignito
- Turba
- Madera
- Cáscara de coco
- Huesos de aceituna
- Cáscara de almendra
- Serrín de madera

Para que estos carbones sean eficaces, es decir, para que aumenten considerablemente su superficie específica, deberán ser activados, lo que puede hacerse por dos vías:

- Activación química. Se realiza mediante la carbonización de las materias primas en presencia de agentes químicos. La activación química se utiliza sobre todo para la obtención de carbón activo en polvo y se basa fundamentalmente en la deshidratación de las materias primas con agentes deshidratantes como  $ZnCl_2$ ,  $H_3PO_4$ , etc., a elevadas temperaturas, entre 400 y 700 °C y posteriormente se realiza una limpieza de cualquier rastro de estos agentes.
- Activación gaseosa oxidante sobre carbón. Se trituran mezclas de carbones hasta conseguir el grano deseado y se carbonizan seguidamente en el horno rotativo para eliminar los volátiles y conseguir porosidad. Después se activan en un horno en presencia de vapor de agua entre 900 y 1100 °C, para eliminar los hidrocarburos residuales, o bien se realiza la activación al oxígeno, a 500-600 °C, o incluso con  $CO_2$ .

La textura del carbón activo es similar a la del grafito, con poros de tres tipos diferentes:

Macroporos, de 50 a 100 nm de radio.

Mesoporos, de 1,8 a 3 nm de radio

Microporos, con un radio inferior a 1,8 nm

Al ser la superficie específica la base para la adsorción, los macroporos prácticamente no participan en el proceso, siendo los microporos los verdaderos protagonistas. Las bacterias no son capaces de penetrar en los microporos y forman películas en la superficie.

Al fabricar los carbones activos, se crean en su superficie grupos funcionales con funciones ácidas. Estos grupos funcionales definen el carácter hidrófilo y el potencial electrocinético del carbón activo, y permiten la fijación de las moléculas polares.

Acciones y usos del carbón activo en polvo

Contaminación temporal

Contaminación accidental

Plaguicidas

Diversos productos tóxicos

## Acciones y usos del carbón activo granular

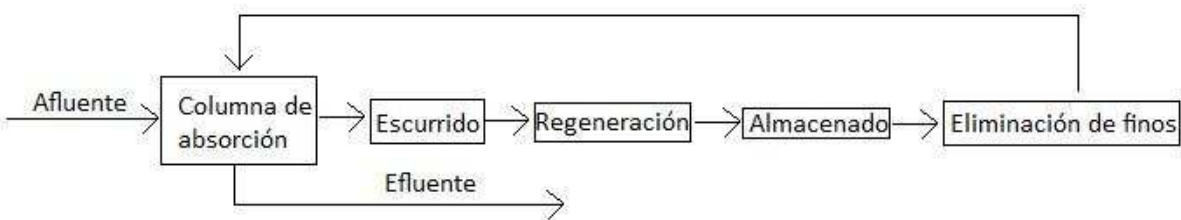
- Plaguicidas
- Detergentes
- Carbón orgánico disuelto
- Nitrificación amónica
- Reducción de oxidantes clorados
- Ligera eliminación de bromatos
- Ligera eliminación de cloratos

### 1.63. Diseño básico

#### - Carbón activo granular

Las condiciones de operación y las variables de diseño más frecuentes son, para adsorción en columna:

- Velocidad de flujo:  $2 - 10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
- Tiempo del lecho: 10 – 30 min.
- Altura del lecho: 4 – 12 m.
- Diámetro: 0,50 – 3 m.
- Longitud de la zona de transferencia de materia: 1 – 3 m



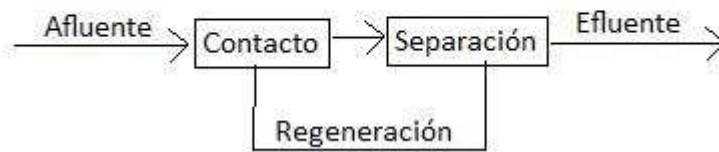
**Figura 18.** Sistema básico para la eliminación de contaminantes por adsorción sobre carbón activo

#### - Carbón activo en polvo

Las condiciones para efectuar una adsorción por contacto, si es con agitación, pueden ser:

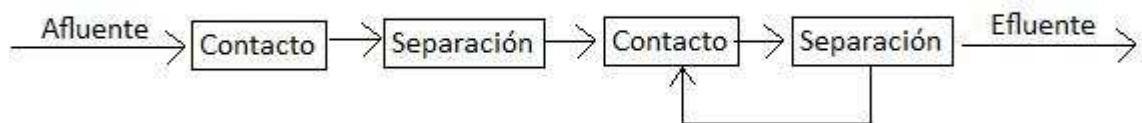
##### 1.63.1. Adsorción en un paso





**Figura 19.** Sistema básico para la eliminación de contaminantes por adsorción sobre carbón activo en un paso

#### 1.63.2. Adsorción en dos pasos



**Figura 20.** Sistema básico para la eliminación de contaminantes por adsorción sobre carbón activo en dos pasos

En este caso se necesita menos adsorbente.

## 1.64. Regeneración adsorbentes

**Tabla 9.** Procedimientos para la regeneración de adsorbentes

Adsorbentes	Procedimiento regeneración	Notas
Resinas orgánicas	Lavado con butatona-2 Lavado con propanona-2 Lavado con butanol-1 Lavado con propanol-1 Lavado con etanol Lavado con metanol Lavado con agua	
Carbón activo en polvo	Proceso WRS (Secado aire comprimido, oxidación, calor) Proceso AST (calor y vapor a alta temperatura)	10% pérdidas 20% pérdidas
Carbón activo granular	Hornos de pisos Hornos eléctricos Hornos de lecho fluidizado	5-20% pérdidas. Caros para pequeñas capacidades Útiles y eficaces

# **CAPÍTULO 9:**

## **LECHOS DE**

### **TURBA**

La turba es el producto de la primera fase de la carbonificación de los vegetales. Contiene del orden del 60 % de carbono.

La turba puede ser clara, llamadas turbas rubias, que es bastante ácida, u oscura, turba parda, con más cal, y pH desde ligeramente ácido a neutro.

El uso de la turba en tratamiento de aguas residuales se basa en el paso de estas a través de una masa de turba, a modo de filtración, proceso en el que producen los siguientes fenómenos:

- Procesos físicos: filtración, adsorción y absorción
- Proceso químico: intercambio iónico
- Proceso biológico: degradación de la materia orgánica por actividad bacteriana

Al entrar en contacto el agua residual con la masa de turba, se produce los fenómenos indicados, con la consiguiente depuración del afluente.

#### **1.65. Proceso**

La masa de turba se instala sobre un lecho de arena de unos 15 cm de espesor, que a su vez está situada sobre una capa de grava de 15-20 cm de espesor.

En el fondo de instalan unas tuberías de drenaje, que recogen el líquido tratado. Ese fondo debe ser impermeable y con una ligera inclinación para facilitar el drenaje.

El agua residual cae sobre el lecho de turba de manera uniforme y suave, y este la va tratando según los procesos antes indicados, hasta que se colmata y se forma una capa de sólidos retenidos en la filtración.

El lecho puede recibir el agua residual sin que se forme una capa líquida sobre él, o bien puede admitir una lámina de agua residual que cubra la turba hasta 20 cm de profundidad, según criterios.

Una vez se ha formado la capa de residuos sobre el lecho, habrá que retirarlos, por lo que estas instalaciones disponen siempre de varios estanques de lechos de turba en número par y funcionando en paralelo, para que mientras unos funcionan, los otros limpian y se acondicionan para repetir su uso.

Los lechos pueden funcionar cada vez de 12 a 20 días, según el caso, debiendo limpiarse al final de cada proceso aireando parte de la turba, lavándola si llega el caso, extrayendo la que se haya degradado más, y renovándola. Si la turba no está demasiado degradada, se deja secar, y una vez que esté seca y aireada, se puede repetir el proceso en ese lecho.

En general, a los 4 o 6 años la turba se degrada mucho y habrá que cambiarla.

## 1.66. Rendimiento

El sistema admite de 10 a 40 l/m<sup>2</sup>/hora de aguas residuales, de calidad y composición similar a la que procesa cualquier otro método biológico y con las mismas limitaciones que estos.

Las necesidades estriban, según diferentes autores, entre 0,25 y 2 m<sup>2</sup> de lecho por persona.

El rendimiento es de los órdenes siguientes:

- DBO<sub>5</sub>: 85-92 %
- DQO: 80 – 92 %
- Sólidos en suspensión: 90 – 95 %
- Metales pesados: hasta el 95 %
- Colorantes: hasta el 90 %

## 1.67. Ventajas

Las ventajas son:

- Bajo coste de construcción
- Bajo coste de mantenimiento
- Se adapta bien al medio
- Acepta fuertes y bruscas variaciones del caudal afluente, de temperatura, de carga
- Con un buen mantenimiento, no genera ni olores ni insectos
- No produce ruido
- Consume muy poca energía
- Es muy apto para industrias con vertidos intermitentes

- Fácil mantenimiento
- Requiere poco nivel técnico de mantenimiento
- Los cambios de material se realizan cada 4 ó 6 años
- Buen rendimiento

# **CAPÍTULO 10: INVESTIGACIONES RECIENTES**

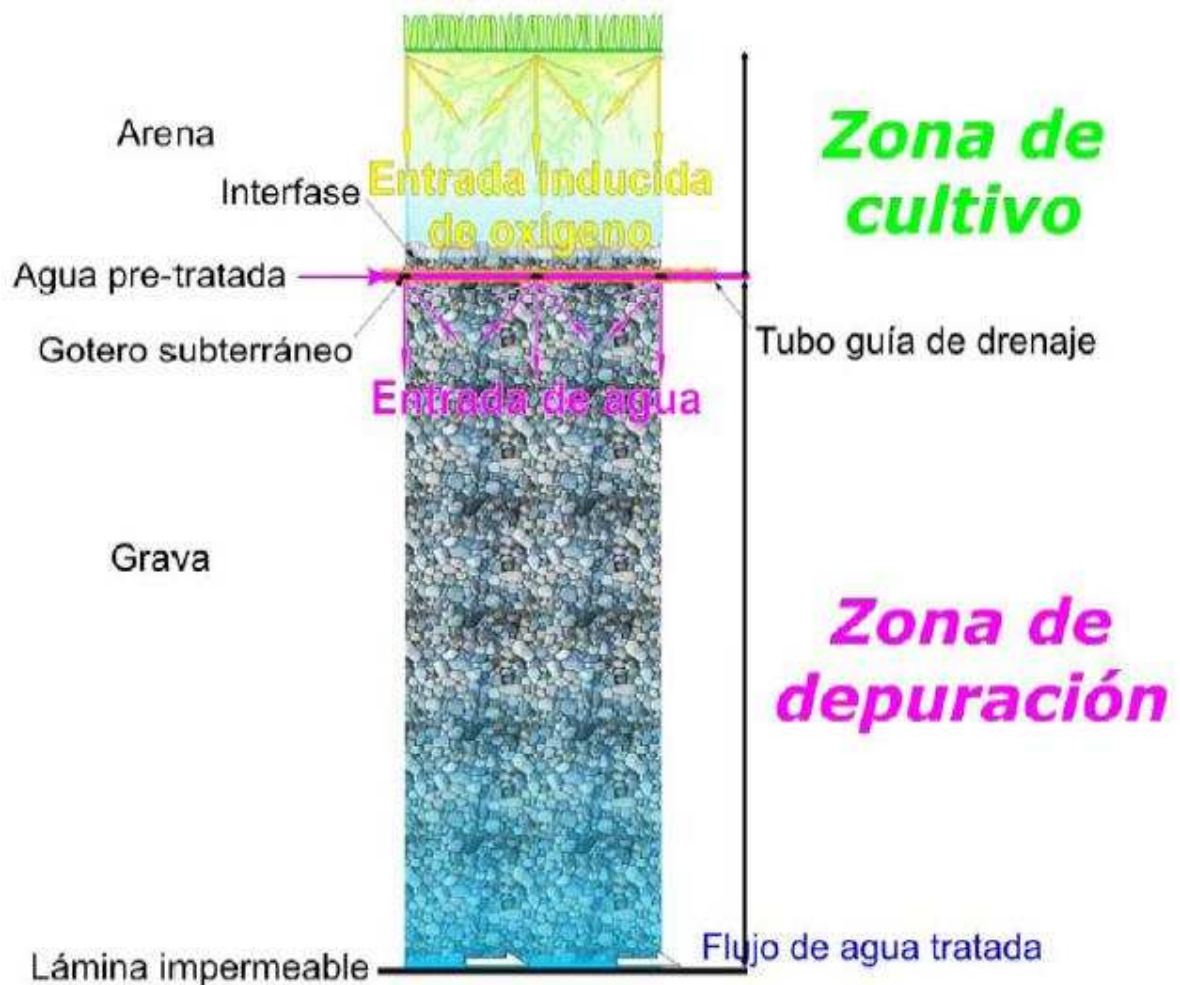
## **1.68. Depuración simbiótica**

La depuración simbiótica es una técnica de depuración, totalmente ecológica, patentada por Javier Fábregas en 1999, que permite la existencia de zonas verdes, agrícolas o deportivas, sobre la superficie de una depuradora de aguas residuales, pudiéndose desarrollar las actividades de la superficie sin impedimentos por la existencia de la depuración biológica.

Esta depuradora ha sido validada por la Entidad de Saneamiento de la Generalitat de Valencia, por la Entidad Regional de Saneamiento y Depuración de la Región de Murcia, por la Consejería de Agua y Medio Ambiente de la Región de Murcia, por la Universidad de Murcia y por la Confederación Hidrográfica del Segura y de los embalses del Cenajoy Santomera, entre otras muchas entidades.

La zona de depuración de este proceso está constituida por un lecho de gravas, de espesor variable, que se aísla del terreno mediante una base impermeable.

La zona de depuración de este proceso está constituida por un lecho de gravas, de espesor variable, que se aísla del terreno mediante la correspondiente base impermeable.



**Figura 21.** Esquema de depuración simbiótica, grosso modo.

El agua residual se aplica por medio de una red de goteros subterráneos, colocados en el interior de las tuberías, sobre gravas, para provocar su percolación a través de las mismas.

Una vez anclada la base impermeable, el agua residual, ya depurada, discurre por gravedad, hacia los puntos de vertido, almacenamiento o bombeo, para su reutilización en otras superficies.

En todo momento, se inyecta aire por difusión desde la superficie, posibilitando que puedan darse condiciones aeróbicas.

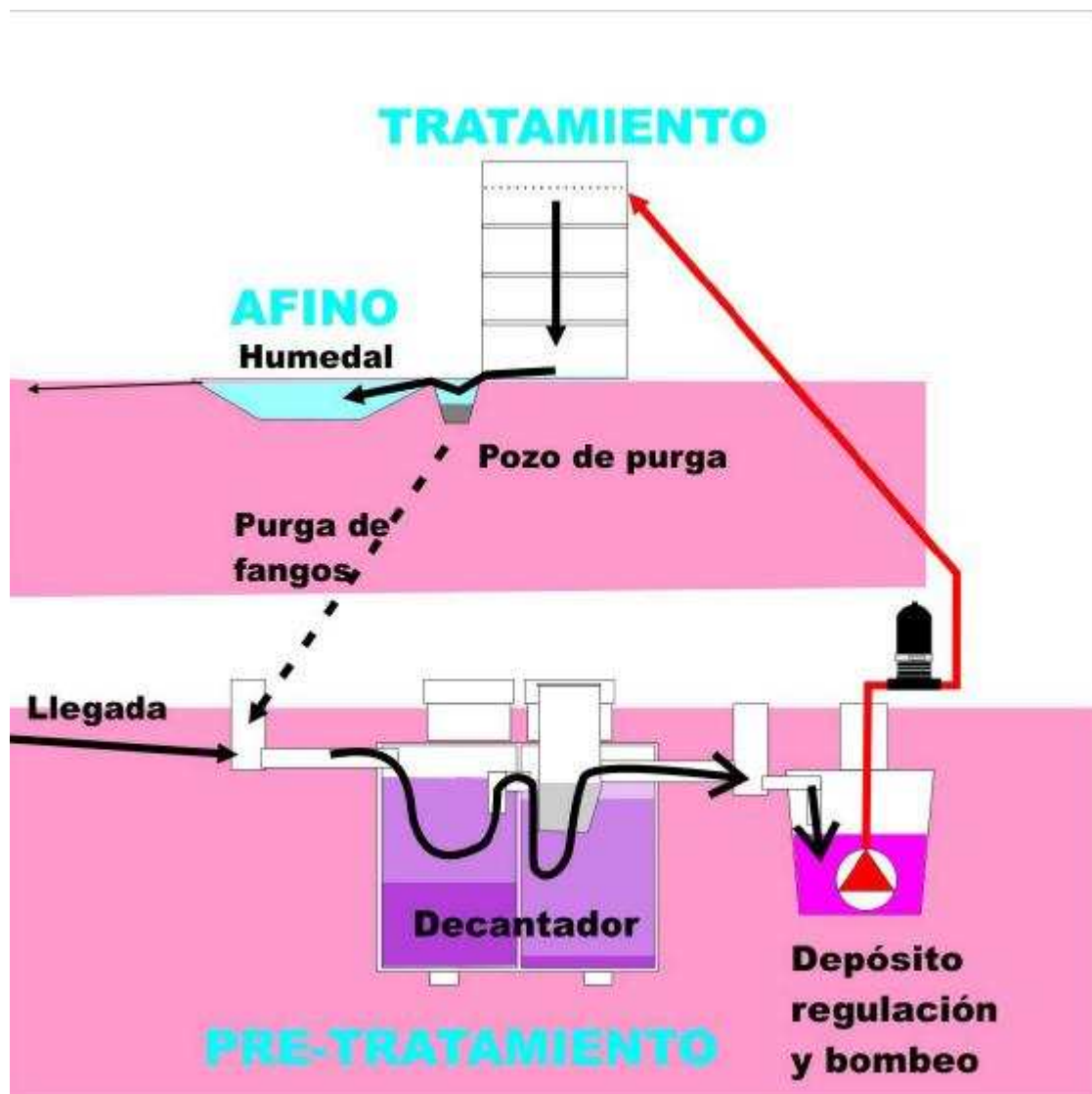
La degradación aeróbica que tiene lugar transforma la materia orgánica a  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , por acción de nematodos, insectos, anfibios que viven junto al lecho o las líneas de goteo, reduciendo la biomasa bacteriana y minimizando la generación de fangos.

La respiración del lecho y/o renovación del oxígeno tiene lugar en dos etapas básicas:

- Consumo de  $\text{O}_2$  por los microorganismos aerobios, por debajo de los goteros.
- Difusión del  $\text{O}_2$  existente por encima de los goteros hacia la zona inferior para equilibrar las concentraciones; se trata de dos zonas en presencia de aire y perfectamente interconectadas.

Este proceso se ve favorecido por:

- El flujo descendente del agua residual a través del lecho
- La alta permeabilidad del sustrato superior, arena, que favorece la entrada de aire y la respiración de las raíces del cultivo simbiótico.
- En este sistema no hay que oxigenar la masa de agua, sino una fina película que envuelve los granos de grava, lo cual posibilita un fenómeno de transferencia de oxígeno similar al que tienen lugar en la superficie de la laguna.
- Las vías adicionales de circulación de aire que forman las raíces de las plantas, nematodos y artrópodos del suelo.



**Figura 22.** Esquema detallado del sistema de depuración simbiótica

La zona de cultivo se sitúa sobre la depuración descrita y está formada por un sustrato arenoso, cuyo espesor (entre 30 y 50 cm.) depende del cultivo que se quiera implantar.



Esta zona proporciona un gran valor económico a los terrenos de la propia depuradora y contribuye, muy eficientemente, al rendimiento de la depuración ya que:

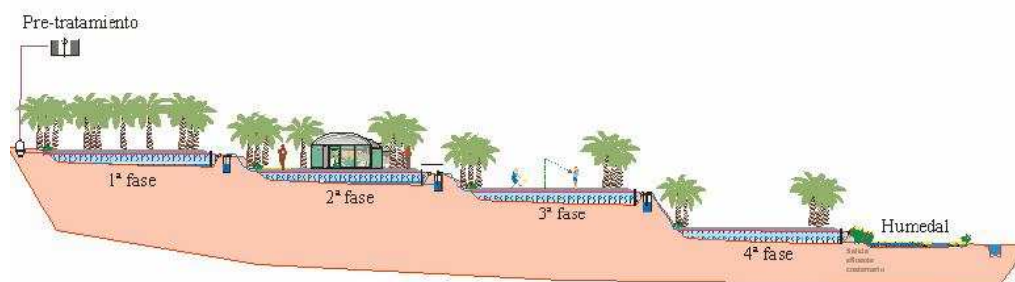
- Evita la evaporación del agua aplicada y consigue que el sistema de depuración sea muy eficiente
- Impide la generación de algas
- Protege a operarios y usuarios del contacto directo con las aguas residuales
- Absorbe por capilaridad, una pequeña parte de la humedad generada por la zona inferior para cubrir las necesidades hídricas de los cultivos implantados.
- La zona de cultivo favorece que el sistema de depuración sea todo momento aerobio, evitándose los problemas de fangos y malos olores.
- Diseño

En el diseño de la depuradora simbiótica se debe tener en cuenta:

- El pretratamiento debe conseguir un contenido de sólidos en suspensión menor de 200 mg/l.
- Los filtros más adecuados son de anillas, autolimpiables, con una luz de paso de 120 micras, para evitar la incrustación de los goteros.
- La tasa de recarga idónea es de 178 l/m<sup>2</sup>/h, con un funcionamiento tanto intermitente como continuo
- La necesidad de superficie filtrante depende del caudal a tratar y del grado de calidad que se desee conseguir. Cuanto mayor sea la carga orgánica de las aguas residuales que se pretenda depurar, el lecho bacteriano necesitará mayor cantidad de oxígeno para la respiración de la masa biótica. Y dado que la entrada de oxígeno al lecho es natural y limitada, se deberá repetir todo el proceso para regenerar aguas de muy alta carga.

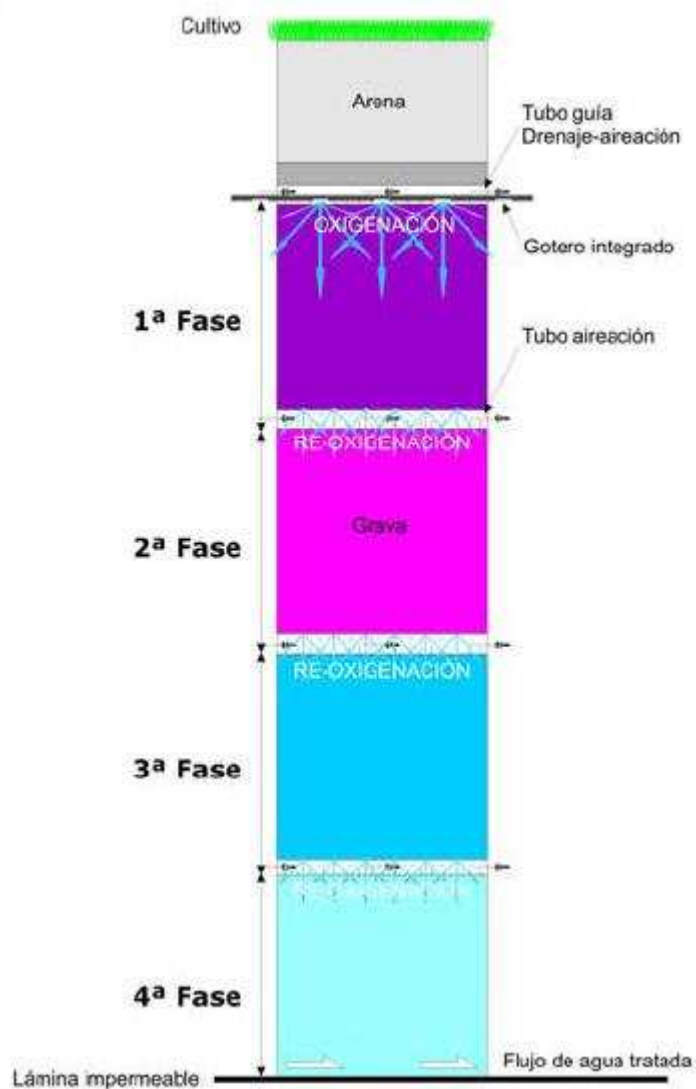
Para la repetición en serie se han ideado dos procedimientos:

- Procedimiento horizontal. Las aguas tratadas en la primera fase se trasladan a nuevas fases de tratamiento, requiriendo nuevas superficies y nuevos bombeos. De esta forma, el tratamiento completo de aguas residuales requerirá más o menos fases en función de la carga orgánica el afluente.



**Figura 23.** Esquema de la depuración simbiótica por procedimiento horizontal

- Procedimiento vertical. Las aguas tratadas en la primera fase pasan libremente a fases inferiores, no precisando de nuevas superficies ni



bombeos.

**Figura 24.** Esquema de la depuración simbiótica por procedimiento vertical

Comparando los dos procedimientos:

- El grado de depuración conseguido en el procedimiento horizontal es ligeramente superior.
- El coste constructivo de ambos procedimientos es aproximadamente el mismo.
- La superficie de infiltración necesaria en el procedimiento vertical es de 0,35 m<sup>2</sup> por cada m<sup>3</sup>/día de agua residual a depurar, mientras que en el procedimiento horizontal este valor hay que multiplicarlo por el número de fases necesarias. Por tanto, para aguas residuales urbanas, la superficie de tratamiento en el procedimiento horizontal es cuatro veces superior a la del procedimiento vertical.

- El coste energético en el procedimiento horizontal es de 0,6 kwh/m<sup>3</sup> de agua tratada, mientras que el procedimiento vertical es de 0,3 kwh/m<sup>3</sup>

Estos dos procedimientos pueden ser alternativos o ejecutarse ambos de forma complementaria, para adaptarse a la calidad de las aguas de entrada y garantizar los mejores rendimientos y resultados finales.

Siempre que el espacio disponible lo permite, es aconsejable, por sus enormes ventajas adicionales, crear un humedal donde recoger la aguas tratadas para su desnitrificación, desinfección prácticamente total, reoxigenación y recuperación de flora en zonas con escasez de recursos hídricos superficiales.

### **Ventajas**

En contraste con el resto de métodos desarrollados, este sistema ofrece un lecho biológico total y continuamente oxigenado por difusión, gracias al estado capilar permanente de las aguas en el lecho, lo cual posibilita la transferencia de oxígeno atmosférico al agua, necesario para la degradación aeróbica.

Estas condiciones permiten el funcionamiento del proceso las 24 horas del día, los 365 días del año, sin paradas ni periodos de encharcamiento, lo cual reduce la generación de fangos y evita obstrucciones en el lecho, aportando la máxima garantía de continuidad.

Este sistema presenta, además, un altísimo rendimiento hidráulica, ya que no se pierde agua por evaporación, y un elevado grado de depuración que termina con la desinfección natural de las aguas sin necesidad de desinfectante alguno.

La ausencia de malos olores es otra característica esencial de este sistema, debido básicamente al carácter aerobio total del tratamiento.

Además, el sistema se adapta perfectamente a altibajos en el afluente, ya que los organismos del lecho siempre disponen del oxígeno necesario para la biodegradación de la materia orgánica.

La ausencia total de luz impide la generación de algas, eliminándose así todos los problemas de colmatación que estas generan en los filtros.

Por último, es importante resaltar al papel de la depuración simbiótica para crear espacios verdes y humedales, originando un excelente recurso hídrico para cualquier utilización.

Podemos concluir entonces que se trata de una técnica ecológica, sencilla y muy eficiente.

## **1.69. Membrana Acuaporina**

Según varios artículos periodísticos del 3 de enero de 2009, Alfredo Gonzalez, un físico gallego está trabajando en el proyecto de encontrar una membrana de depuración de agua que sea estable y que esté formada por la proteína "acuaporina" obtenida de la espinaca. Este enzima purifica los líquidos que pasan al interior de las células por ósmosis. Es común a los seres vivos pero diferente a cada especie.

Esta membrana sería novedosa frente a las membranas actuales basadas en lípidos.

El proyecto se está llevando a cabo en el Clúster biomédico de Dinamarca y Suecia, conocido como "Medical Valley". Se comenzó hace tres años y está financiado hasta el 2010.

## **1.70. Biorremediación**

La biorremediación es el proceso en el que se emplean organismos biológicos, componentes celulares y enzimas libres, para resolver problemas específicos medioambientales, como puede ser en este caso la contaminación del agua. Al contrario de la biodegradación que se produce naturalmente, la biorremediación es un proceso iniciado por el hombre con el propósito de subsanar el medio ambiente.

El objetivo desde el punto de vista químico es realizar una mineralización, una transformación parcial, la humificación de los residuos o de agentes contaminantes y una alteración del estado redox de los metales.

No es posible tratar todos los contaminantes por el uso de la biorremediación; por ejemplo, los metales pesados, como cadmio o plomo no son absorbidos o captados fácilmente por los organismos. La absorción de mercurio en la cadena alimentaria puede empeorar la situación, pues este elemento se bioacumula en los organismos.

Cabe señalar que cuanto más diversidad biológica existe en un ecosistema con mayor eficiencia podrá autodepurarse.

En general, existen dos estrategias para biorremediar un sistema:

- Agregar nutrientes para estimular las poblaciones naturales, aumentándose así su actividad
- Introducir microorganismos exógenos dentro del sistema para llevar a cabo de biorremediación. En este caso, la ingeniería genética puede emplear los microorganismos genéticamente modificados haciéndolos más eficientes en la biorremediación.

Actualmente todavía es un sistema en desarrollo y que va unido a las evoluciones de la ingeniería genética.