

# Procesos biopelícula de depuración de aguas residuales: procesos convencionales

Tejero, I.; Jácome, A.; Lorda, I.; Santamaría, C.  
EQUIPO BIOPELICULA DE LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA.

## 1. LOS PROCESOS BIOLÓGICOS

**E**l fundamento de los procesos biológicos de depuración de aguas consiste en la eliminación de la contaminación del agua mediante una biocenosis ubicada en un lugar adecuado mediante el control del ambiente. (Fig. 1.1) La biocenosis o comunidad de organismos vivos generalmente está constituida por microorganismos, pero en algunos procesos pueden llegar a intervenir o incluso tener importancia organismos superiores. La contaminación del agua constituye el sustrato o alimentos de dicha biocenosis, la cual se mantendrá controlada en un cierto lugar al que denominaremos reactor biológico. En dicho reactor se deben mantener las condiciones ambientales para permitir el desarrollo óptimo de la biocenosis. Así, si ésta es de tipo aerobio se suministrará el oxígeno suficiente para mantener condiciones aerobias en el reactor, por el contrario si fuese de tipo anaerobio se evitará la entrada de oxígeno al sistema para mantener condiciones anaerobias. Como consecuencia del consumo de sustrato y de los nutrientes la biomasa del reactor aumentará lo cual puede exigir la ex-

tracción del crecimiento de biomasa (fango) para dejar al agua sin esta.

La contaminación del agua, sustrato y/o nutrientes, quedará eliminada debido a su utilización por la biocenosis, la cual generará productos como son anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) en ambiente aerobio,  $\text{CO}_2$  y metano en ambiente anaerobio, nitrógeno y sulfídrico en ambiente anóxico.

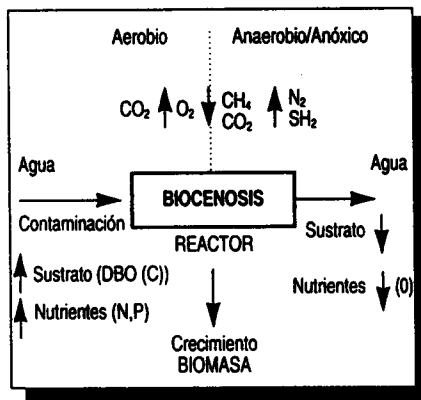


Fig. 1.1. Fundamento de los procesos biológicos

## 2. TIPOLOGIA BÁSICA DE PROCESOS BIOLÓGICOS

Se pueden realizar múltiples clasificaciones de los procesos biológicos basándose en distintos aspectos. A continuación se destacan algunas de ellas (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Tipos de procesos biológicos.

PROCESOS BIOLÓGICOS	Según el elemento a eliminar o transformar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eliminación de Materia Orgánica Carbonosa (o DBO (C))</li> <li>• Nitrificación (o eliminación de DBO (N))</li> <li>• Desnitrificación</li> <li>• Eliminación de Fósforo</li> </ul>
	Según potencial de oxidación/reducción del medio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aerobio</li> <li>• Anóxico</li> <li>• Anaerobio</li> </ul>
	Según la forma de estar la biomasa en el reactor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cultivo en Suspensión</li> <li>• Cultivo fijado a soportes</li> </ul>

Según el elemento contaminante a eliminar o transformar se pueden diferenciar: Procesos biológicos para la eliminación de materia orgánica carbonosa, es decir para la eliminación de la DBO o DBO carbonosa; para la eliminación de la demanda bioquímica de oxígeno debida al nitrógeno o DBO nitrogenada que corresponde a los

procesos denominados de nitrificación, es decir transformación de nitrógeno orgánico y amoniacal a nitritos y nitratos; para la eliminación de nitrógeno oxidado (nitritos, nitratos) en forma de nitrógeno gaseoso, también denominados procesos de desnitrificación; para la eliminación global de nitrógeno como combinación de los dos anteriores (nitrificación-desnitrificación); y para eliminación de fósforo.

Según el potencial de oxidación-reducción en el que se va a desarrollar la reacción biológica se pueden diferenciar procesos aerobios, que necesitan oxígeno; anóxicos, con ausencia o escasez de oxígeno disuelto; y anaerobios en ambiente con ausencia estricta de oxígeno disuelto. A la vez pueden existir procesos en los que se combinen varios de estos ambientes.

Por último, la biocenosis en el reactor se puede mantener por diversos métodos. De los dos principales, el primero corresponde a lo que denominamos cultivo en suspensión, es decir, los microorganismos se encuentran en suspensión en el seno del agua por lo que es necesario separarlos del agua efluentes del reactor y devolverlos al reactor para mantener una concentración de biomasa; en el segundo, o cultivo fijado a soportes, los microorganismos se fijan a diferentes medios materiales o soportes con lo que quedan retenidos en el reactor a pesar del paso del agua a tratar a través del mismo, no siendo arrastrados con ella. El proceso de tratamiento de aguas residuales más representativo de los de cultivo en suspensión es el denominado proceso de fangos activos que será estudiado en temas posteriores. Al segundo grupo de procesos, es decir los procesos biológicos de cultivo fijado a soportes, también se les denomina procesos de **película fija** o de **película biológica** o **procesos biopelícula** que es como preferimos denominarlos nosotros. En lo que sigue, nos vamos a referir a los procesos biopelícula aerobios para la eliminación de materia orgánica carbonosa.

### 3. BASES TEORICAS DE LOS PROCESOS BIOLÓGICOS

Con el fin de entender y analizar los procesos biológicos de depuración de

aguas, se estudia a continuación el comportamiento de los microorganismos frente al alimento o sustrato disponible, profundizando en la capacidad o velocidad a la que son capaces de utilizarlo, eliminarlo o metabolizarlo. Para ello se analiza la evolución de las poblaciones en diferentes circunstancias y la cinética (biocinética) de eliminación o utilización del sustrato.

#### 3.1. Análisis de poblaciones

Si se toma un cierto sustrato con cantidades en exceso de nutrientes esenciales y se realiza una siembra de una especie microbiana concreta (bajo ciertas condiciones, se obtiene lo que se denomina un cultivo puro) se puede estudiar como evoluciona su población o su biomasa en el tiempo. La representación gráfica de este fenómeno queda reflejada en la Fig. 3.1.

Al principio los microorganismos se aclimatan al nuevo medio, provocando un cierto retardo en su crecimiento, para después, en abundancia de alimento, crecer exponencialmente. En esta fase predomina el anabolismo, asimilación o síntesis de alimento.

Según va aumentando el número de individuos el alimento empieza a escasear, y la población tiende a un límite o saturación. A partir de este momento y en presencia de muy bajas concentraciones de alimento la población empieza a decrecer siendo preponderante los fenómenos de catabolismo, desasimilación o respiración endógena.

Realizando este ensayo para diferentes especies se puede ver que cada una tiene tasas de crecimiento (o tiempos de duplicación) específicos y diferentes entre sí.

Si, al contrario que en el caso anterior, se realiza una siembra de múltiples especies, su evolución puede ser descrita por la siguiente figura, (Fig. 3.2.).

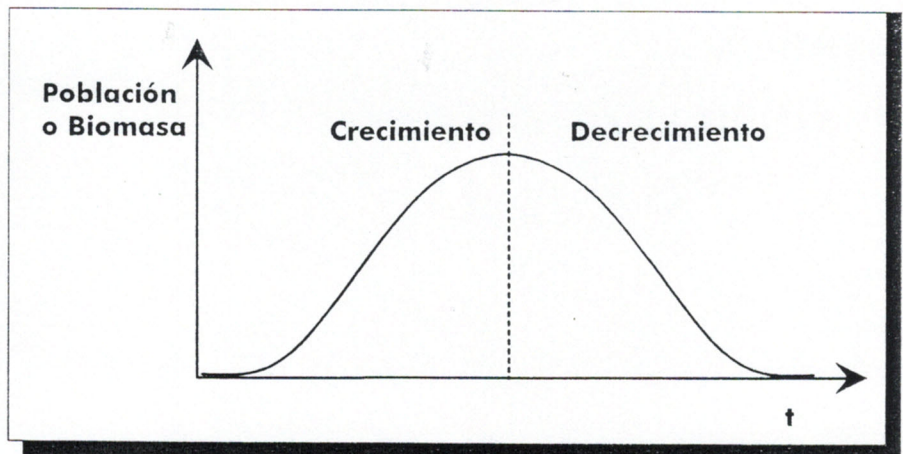


Fig. 3.1. Evolución de la población o biomasa en un cultivo puro.

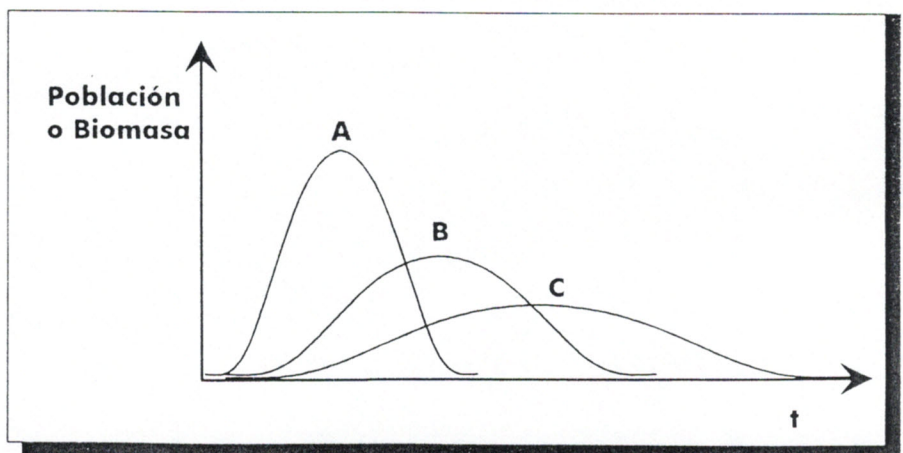


Fig. 3.2. Evolución de las poblaciones en cultivo mixto.

Las especies con mayor tiempo de duplicación (crecimiento más lento), tardan más en aparecer en cantidades apreciables, e incluso, hay algunas especies (C) que para llegar a desarrollarse necesitan el desarrollo de otras especies (A) sobre las cuales realizan predación. De este simple análisis puede apreciarse que si en un reactor biológico limitamos el tiempo de estancia de los microorganismos impediremos el desarrollo de las especies de más lento crecimiento o de tiempo de duplicación superior al tiempo límite establecido. De esta manera, en algunos procesos biológicos, el tiempo de estancia de los microorganismos (tiempo de retención celular) será una importante variable de control, de tal manera que posibilitará el desarrollo de unas especies y evitará el desarrollo de otras.

### 3.2. Biocinética de eliminación de sustrato

Estudiando el comportamiento de una población microbiana frente al sustrato (limitante de su crecimiento) y específicamente la velocidad a la que es capaz de procesar, utilizar o eliminar dicho sustrato, Monod llegó a describir el fenómeno gráficamente (Fig. 3.3) y matemáticamente (Ec. 3.1), mediante lo que hoy conocemos por modelo de Monod.

$$\frac{ds}{dt} = \frac{k \cdot s \cdot x}{K_s + s} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

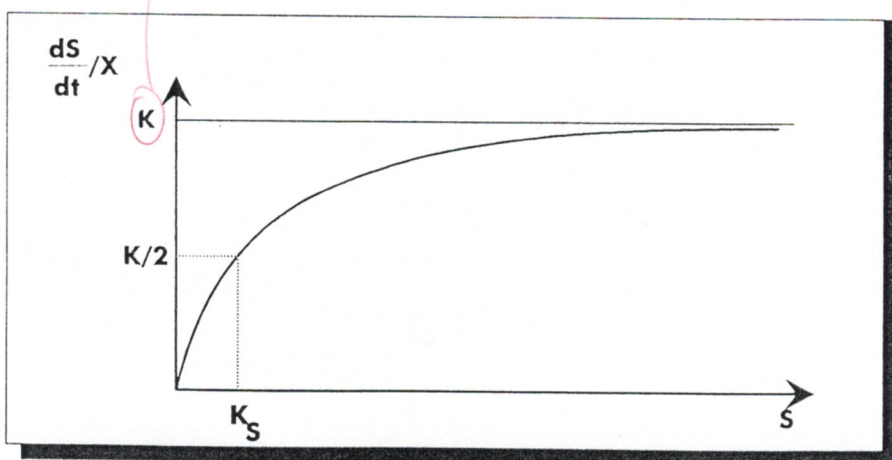


Fig. 3.3. Modelo de Monod de cinética de utilización del sustrato por los microorganismos.

Donde:

- (ds/dt) = Velocidad de utilización, consumo o eliminación del sustrato.
- (x) = Concentración de biomasa que consume el sustrato.
- (s) = Concentración de sustrato.
- (k) = Tasa máxima de utilización del sustrato por los microorganismos.
- (K<sub>s</sub>) = Constante de semisaturación, o concentración de sustrato para la que la tasa de utilización del sustrato por los microorganismos es igual a la mitad de la tasa máxima.

Analizando el modelo de Monod puede deducirse que si con un proceso biológico se pretende conseguir un alto rendimiento de depuración, es decir bajas concentraciones de sustrato, la velocidad de eliminación del sustrato no podrá ser muy grande, mientras que si se pretende obtener un proceso biológico con gran capacidad de eliminación de sustrato, es decir gran velocidad de eliminación, habrá que mantener concentraciones de sustratos elevadas, es decir bajos rendimientos.

### 3.3. Biocinética de crecimiento de la biomasa

Según Heukelekian, la velocidad de crecimiento de la biomasa es proporcional a la velocidad de eliminación o utilización del sustrato (crecimiento por síntesis de alimento), pero en caso de inexistencia de sustrato,

la biomasa disminuye debido al autoconsumo, muerte o **respiración endógena**. En concreto:

$$\frac{dx}{dt} = Y \frac{ds}{dt} - k_d \cdot x \quad (\text{Ec. 3.2})$$

donde,

- dx/dt = Velocidad de crecimiento de la biomasa.
- ds/dt = Velocidad de eliminación del sustrato.
- Y = Tasa de producción de biomasa por unidad de sustrato.
- X = Concentración de biomasa presente.
- K<sub>d</sub> = Tasa de respiración endógena.

### 3.4. Biocinética del consumo de oxígeno (procesos aerobios)

De forma similar al caso anterior, se puede plantear que el consumo de oxígeno estará influido por la eliminación o utilización del sustrato y por el mantenimiento o respiración de la biomasa presente. Es decir:

$$\frac{do}{dt} = a \cdot \frac{ds}{dt} + b \cdot x \quad (\text{Ec. 3.3})$$

donde,

- do/dt = Velocidad de consumo de oxígeno por la biomasa.
- ds/dt = Velocidad de eliminación del sustrato.
- x = Biomasa presente.
- a = Coeficiente de utilización de oxígeno para síntesis.
- b = Coeficiente de respiración de la biomasa.

Ambos coeficientes varían con el tipo de proceso.

## 4. ANALISIS DE LA BIOPELICULA

En los procesos biológicos en los que la biocenosis se fija en la superficie de un material o medio soporte, ésta crea una capa con alto contenido en agua y gran concentración de biomasa que recubre el soporte y que de-

nominamos película biológica o **biopelícula**. A los reactores biológicos en los que la biocenosis está presente en forma de biopelículas los denominaremos **reactores biopelícula**. Y a los procesos de tratamiento biológico del agua que engloban reactores biopelícula los denominaremos procesos **biopelícula**. Dado que en este tipo de reactores y procesos la biopelícula es la base de su funcionamiento, a continuación se estudian algunas de sus características básicas, como son: su formación, composición y características físicas, transporte de materiales

y reacción, crecimiento-desprendimiento y modelos de simulación.

#### 4.1. Formación y acumulación

En el análisis del fenómeno de colonización y formación de biopelícula sobre medios soportes se pueden diferenciar (según Characklis) los siguientes pasos o etapas (Fig. 4.1):

1. Acondicionamiento del medio soporte al absorberse moléculas orgánicas sobre su superficie.

2. Transporte de células microbianas desde el seno del agua (líquido) hasta el medio soporte acondicionado.

3. Parte de las células que llegan al soporte se absorben a él por un tiempo limitado, separándose (desorción) posteriormente (**adsorción reversible**). La desorción se puede producir por la fuerza cortante del fluido, influyendo también otros factores físicos, químicos y biológicos.

4. Una parte de las células adsorbidas quedan inmobilizadas permanentemente (**adsorción irreversible**).

5. Las células adsorbidas irreversiblemente crecen a expensas del sustrato y del agua incrementando así el número de células en la biopelícula. A su vez, las células pueden también producir o formar cantidades significativas de productos excretados algunos de ellos, como por ejemplo las sustancias poliméricas extracelulares (EPS), que quedan constituyendo parte de la biopelícula. Así, la acumulación de biopelícula aumenta mediante el metabolismo microbiano a expensas del sustrato del agua.

6. Adhesión de células microbianas y material particulado a la biopelícula (**atrapamiento**).

7. Separación de parte o porciones de la biopelícula que vuelven al agua. Esta separación puede ser debida al esfuerzo cortante producido por el movimiento del fluido (**erosión**), a la acción mecánica de otras partículas que chocan contra la biopelícula (**abrasión**) y al desprendimiento de capas de biopelícula (**desprendimiento masivo**) debido a la pérdida de cohesión o de adherencia de la biopelícula.

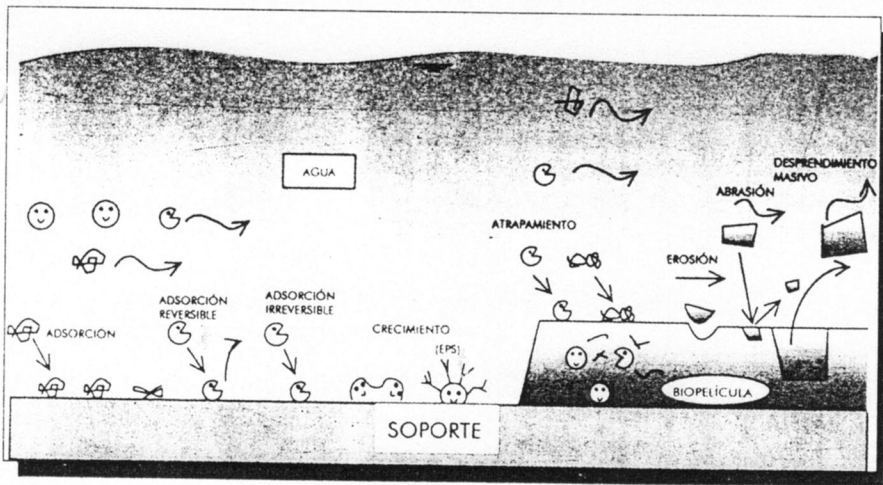


Fig. 4.1. Formación de una biopelícula.

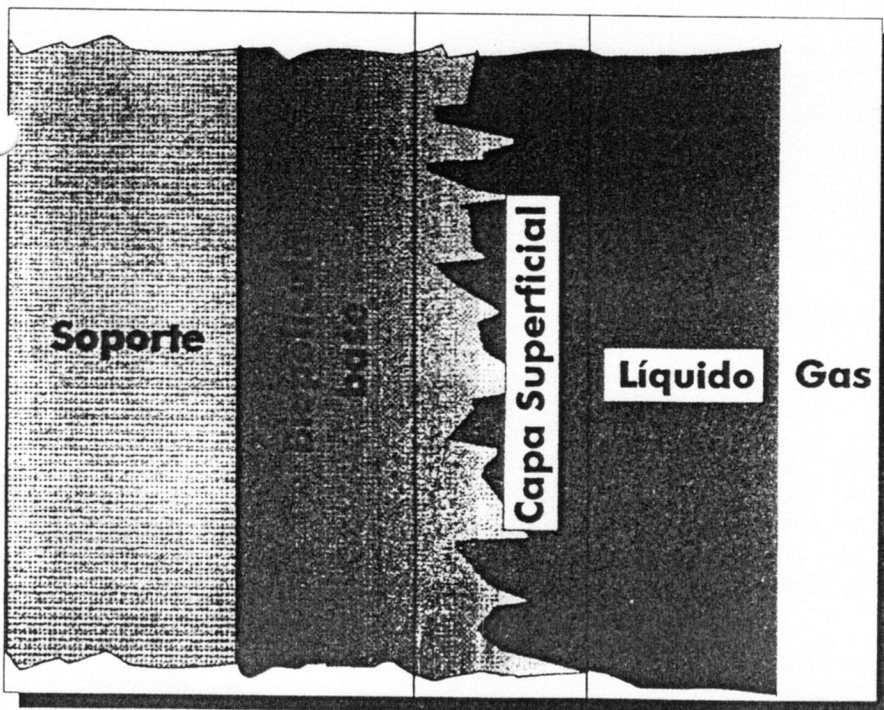


Fig. 4.2. Componentes de un sistema biopelícula.

#### 4.2. Composición

Una biopelícula consiste en células inmobilizadas en un medio soporte, embebidas, frecuentemente, en una matriz de polímeros orgánicos (EPS) de origen microbiano y con una fracción significativa de sustancias abióticas o inorgánicas unidas por la matriz biótica (Characklis, 1990).

De forma general, en un sistema biopelícula se pueden diferenciar cuatro partes (Fig. 4.2): Soporte, biopelícula, capa líquida y gas. A su vez, en la biopelícula se pueden diferenciar

dos capas: la biopelícula base y la capa superficial.

Debido a que el tiempo de estancia de los microorganismos en las biopelículas no es una variable de control de los procesos biopelícula y que éste en general puede ser muy elevado, pueden coexistir muchas especies de microorganismos e incluso macroorganismos tales como caracoles, insectos, etc. (Fig. 4.3).

### 4.3. Características físicas

La densidad de las biopelículas varía desde valores tan bajos como  $10 \text{ Kg/m}^3$  hasta valores de  $105 \text{ Kg/m}^3$ . (Characklis, 1990), siendo todavía mayor la variación si se analiza la densidad por capas dentro de la biopelícula (8 a  $147 \text{ Kg/m}^3$ , Zhang y Bishop, 1994). Las mayores densidades

se encuentran en las capas próximas al soporte (Fig. 4.4).

Los espesores de la biopelícula pueden variar tremendamente. Se pueden encontrar biopelículas con espesores en un rango muy amplio, desde prácticamente el tamaño de las células ( $1-10 \mu\text{m}$ ) en una biopelícula en formación, hasta más de  $30 \text{ mm}$ . En procesos biopelícula aerobios los valores normales oscilarán entre  $100 \mu\text{m}$  (biopelículas nitrificantes) hasta  $2$  a  $5 \text{ mm}$  (biopelículas heterótrofas de alta carga).

El espesor de una biopelícula es función de la carga orgánica aplicada, del esfuerzo cortante al que está sometida, tipo de sustrato, tipos de microorganismos, pH, temperatura, resistencia de la biopelícula, rugosidad del soporte y edad de la biopelícula.

Una biopelícula puede evolucionar hasta un espesor máximo (correspondiente a las condiciones ambientales a las que está sometida), resultado del equilibrio entre la acumulación (crecimiento) y el desprendimiento, o bien oscilar en un cierto rango consecuencia de la variación brusca del espesor debido a los desprendimientos masivos.

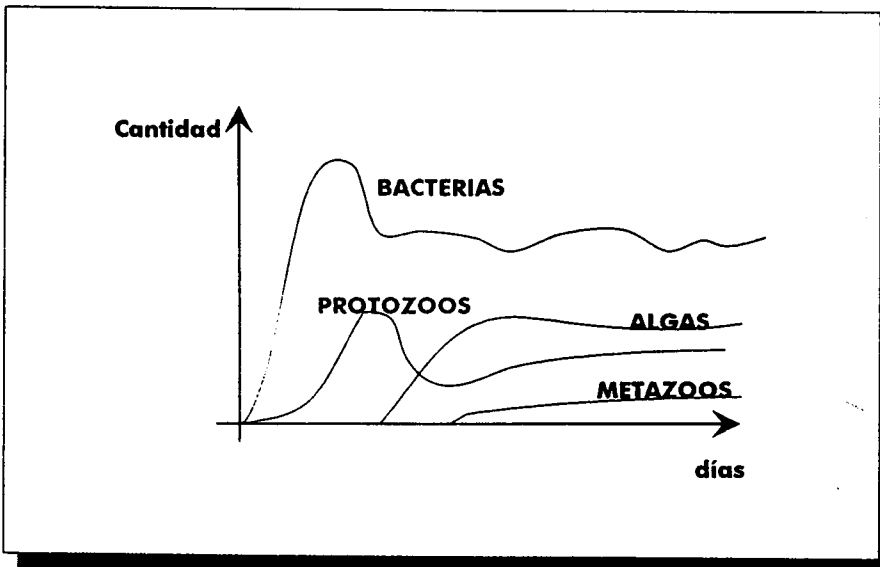


Fig. 4.3. Sucesión de microorganismos en una biopelícula.

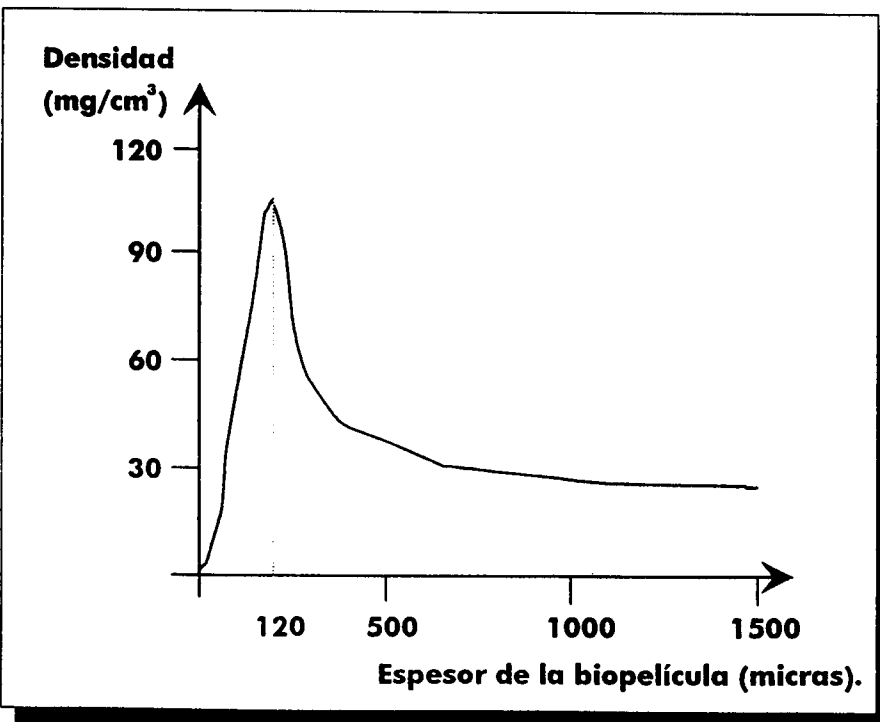


Fig. 4.4. Variación de la densidad de la biopelícula con su espesor total (Hoehn y Ray, 1973)

### 4.4. Transporte de materiales y reacción

Para que la biopelícula elimine el sustrato del agua residual, tanto éste como el oxígeno (biopelícula aerobia), tienen que acceder al lugar donde se va a realizar la reacción biológica, que es donde se encuentran los microorganismos, es decir al interior de la biopelícula. Tanto el transporte de sustrato como de oxígeno desde el seno del agua, deben atravesar una capa líquida pegada a la superficie de la biopelícula, con baja turbulencia y por tanto baja transferencia, y difundirse hacia el interior de la biopelícula como consecuencia de la disminución de sus concentraciones en el interior debido a su consumo (reacción) por la biocenosis (Fig. 4.5). Ambos fenómenos de transporte (transferencia y difusión) suelen limitar la capacidad máxima de utilización de sustrato por las biopelículas.

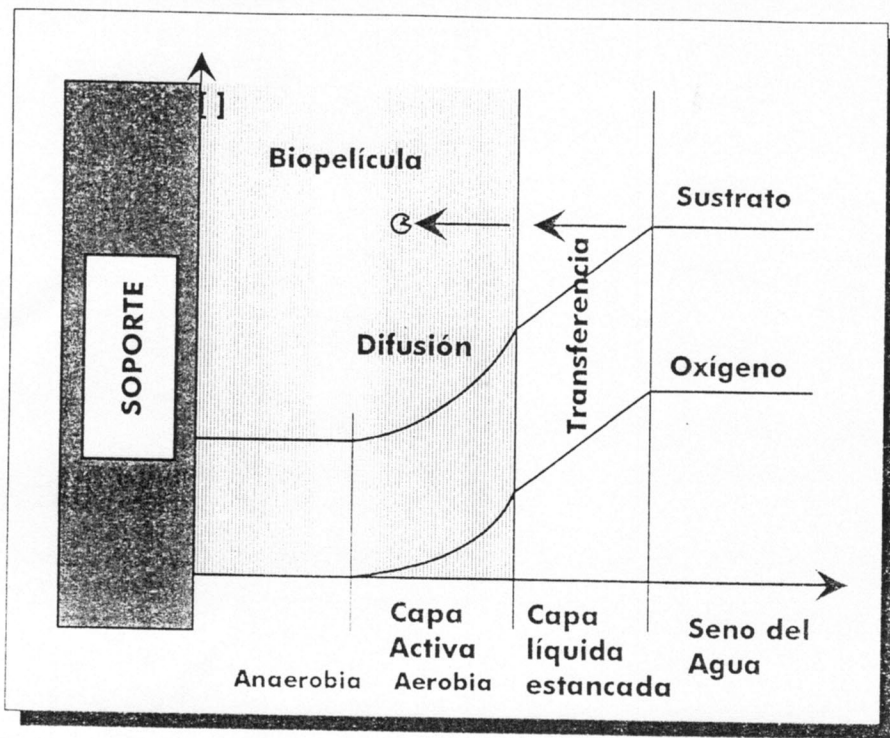


Fig. 4.5. Fenómenos de transporte de materiales en la biopelícula. Perfiles de concentración

Si se analizan las concentraciones de sustrato y oxígeno en profundidad en la biopelícula puede verse que estas disminuyen desde el seno del líquido, primero en la capa líquida estancada y después en el interior de la biopelícula (Fig. 4.5). Si uno de los dos reactantes desaparece, la capa más profunda no será activa. Surge así el concepto de **capa activa** (y espesor activo) para denominar a dicha capa superficial.

Cuando es el oxígeno el que desaparece en el interior de la biopelícula se producirán fenómenos anóxicos y anaerobios en la biopelícula. Tanto en este caso como cuando llega a ser muy pequeña la concentración de sustrato se pueden llegar a producir disminuciones de la cohesión y adherencia (formación de gases ( $\text{CH}_4$ ), lisis celular por inanición) que provocan desprendimientos masivos de biopelícula.

El aporte de oxígeno a la biopelícula puede realizarse desde el oxígeno disuelto del seno del agua, fenómeno controlado por la transferencia turbulenta, o bien directamente desde el gas (aire, oxígeno), al entrar en contacto con la biopelícula, fenómeno que denominamos **transferencia biológica** y que bajo ciertas circunstan-

cias puede ser muy superior al primero (5 a 20 veces).

#### 4.5. Modelos de simulación

Considerando los fenómenos anteriormente descritos de transporte de materiales (transferencia y difusión), reacción, crecimiento y desprendimiento de la biopelícula, se puede establecer un modelo matemático de simulación del funcionamiento de la biopelícula, que unido a un modelo de reactor y de proceso puede permitir simular los reactores y procesos biopelícula. En este sentido hoy día existen los modelos **Biosym** y **Aquasym** del Instituto Federal Suizo. Análogamente, el equipo biopelícula de la Universidad de Cantabria viene desarrollando este tipo de modelos.

### 5. TIPOLOGIA DE PROCESOS BIOPELICULA (AEROBIOS)

Dada la gran variedad de procesos biopelícula, el realizar una clasificac-

ción exhaustiva de los mismos, resulta difícil y complejo. A continuación presentamos una clasificación que no pretende ser completa (Tabla 5.1).

Tabla 5.1. Tipología de procesos biopelícula aerobios.

PROCESOS BIOPELICULA	
De medio no saturado	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lechos bacterianos o filtros percoladores</li> <li>• Torres biológicas (o biorreactores)</li> <li>• Filtro intermitente de arena</li> <li>• Tratamiento por aplicación al terreno</li> </ul>	
De medio saturado, inundado o sumergido	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• De soporte móvil (en operación o en lavado) (granulos o partículas)               <ul style="list-style-type: none"> <li>• De soporte inerte                   <ul style="list-style-type: none"> <li>- biofiltros aireados</li> <li>- lecho expandido</li> </ul> </li> <li>- lecho fluidizado                   <ul style="list-style-type: none"> <li>bifásico: Agua/Partícula-Biomasa</li> <li>trifásico: Agua/Aire/Partícula-Biomasa</li> </ul> </li> <li>- fangos activos con partículas soporte</li> <li>- procesos de biopelícula extraíble (BE)</li> </ul> </li> <li>• De soporte activo</li> <li>• De soporte fijo:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Con aireación del lecho: BLAS                   <ul style="list-style-type: none"> <li>- soporte rígido                       <ul style="list-style-type: none"> <li>relleno de partículas soporte estructurado</li> </ul> </li> <li>- soporte permeable a gases                       <ul style="list-style-type: none"> <li>-RBSP (Eguía, 1991; Jácome, 1991; Vidart, 1992; Lolmede, 1992; Valenzuela, 1993)</li> <li>-Humedales</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>• Sin aireación del lecho</li> </ul> </li> </ul>	
De medio intermitentemente sumergido	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• RBC: Contactores Biológicos Rotatorios</li> <li>• Biodiscos (Amieva, 1993; Bezanilla, 1993)</li> <li>• Biocilindros</li> <li>• Lechos de inundación (precursores de los lechos bacterianos)</li> </ul>	

A continuación se describen los dos procesos biopelícula que se pueden considerar convencionales, que tienen un gran número de aplicaciones reales y que deben considerarse siempre en la selección de alternativas de depuración para municipios de pequeña y mediana población.

### 6. LECHOS BACTERIANOS

#### 6.1. Concepto

El reactor biológico de un proceso de lechos bacterianos es un reactor

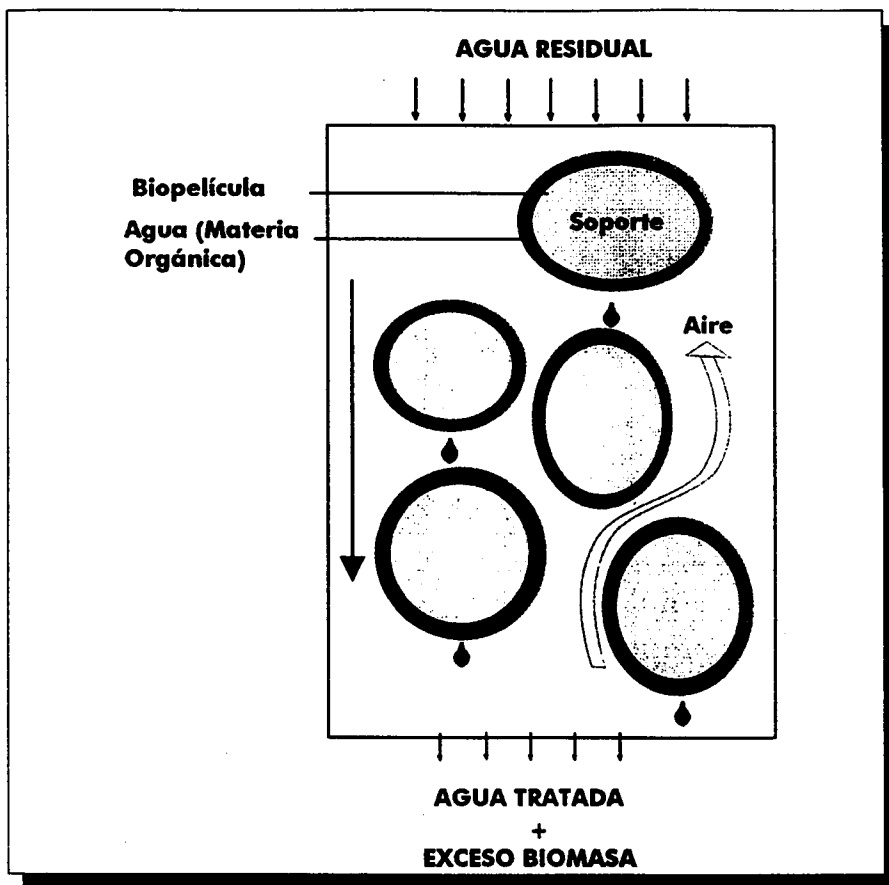


Fig. 6.1. Esquema funcional de un lecho bacteriano

biopelícula aerobio de cultivo fijado a un medio soporte, en el que el agua con el substrato pasa a través del lecho que forma el medio soporte sin llegar a inundarlo, dejando aire en los intersticios o huecos que quedan entre los soportes, permitiendo así la oxigenación de la biopelícula (Fig. 6.1). Para conseguir este objetivo el agua afluyente se riega sobre la superficie del lecho y este agua aplicada infiltra o percola a través de los huecos o intersticios del lecho. Por estas consideraciones a los lechos bacterianos también se les denomina filtros percoladores, filtros de escurrimiento o filtros de goteo.

En los primeros lechos bacterianos el medio soporte estaba constituido por piedras, éstas con el tiempo se han llegado a sustituir por material plástico con diferentes configuraciones que al permitir hacer lechos bacterianos (el reactor biológico) de altura importante se les ha llegado a denominar torres biológicas o biorreactores.

Los huecos del lecho bacteriano pueden llegar a taponarse, bien debi-

do a un excesivo crecimiento de la biopelícula, bien debido a la acumulación de trozos de biopelícula arrastrados por el agua circulante tras los desprendimientos masivos de la misma. Este fenómeno condiciona el diseño de los lechos bacterianos, bien a través de la configuración geométrica del soporte y del lecho como a través de la limitación de las variables funcionales del sistema.

## 6.2. Descripción del proceso

De una forma general los elementos principales del proceso son:

- El reactor biológico o lecho bacteriano propiamente dicho con su correspondiente sistema de alimentación de agua residual y su sistema de ventilación, bien natural o forzada.
- El decantador secundario, con la correspondiente extracción de

fangos producidos (exceso de biomasa) o biopelícula erosionada y desprendida, y

- La recirculación de agua al reactor.

A continuación se analizan cada una de las partes del reactor biológico.

### 6.2.1. Medio soporte

Los dos principales materiales utilizados como medio soporte han sido:

A) Piedras, con tamaño entre 25 y 100 mm. y de diferentes materiales (silíceo, puzolanas, coque, escoria, etc.)

B) Material plástico con diferentes configuraciones bien como piezas sueltas relleno del reactor de forma aleatoria o bien mediante módulos estructurados dispuestos ordenadamente para formar el lecho (Fig. 6.5).

Las principales características o variables del medio soporte son:

- la superficie específica, y
- el índice de huecos.

La superficie del medio soporte expuesta al aire por unidad de volumen de lecho, podría llegar a maximizar la superficie de biopelícula ( $m^2/m^3$ ) y por lo tanto la biomasa en el sistema.

El índice de huecos o porcentaje (en volumen) de espacio vacío o de huecos del lecho en relación al volumen total del lecho, da idea del volumen disponible para la biopelícula o biomasa, el agua que escurre y el aire necesario para la oxigenación. El medio soporte ideal debería de disponer de la máxima superficie específica, con el máximo índice de huecos; valores típicos se indican en la Tabla 6.1.

Si se analiza el material granular como medio soporte, puede verse que cuanto más pequeño sea, mayor tendrá la superficie específica pero también más pequeñas serán las dimensiones de los huecos intersticiales, por lo que más fácilmente se colmatará al crecer la biopelícula. Este último problema, se puede evitar aumentando el tamaño de los gránulos, pero con ello, también se consigue disminuir la superficie específica. Así, los límites

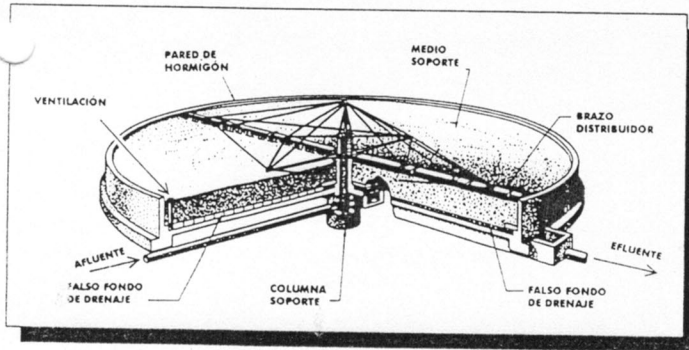
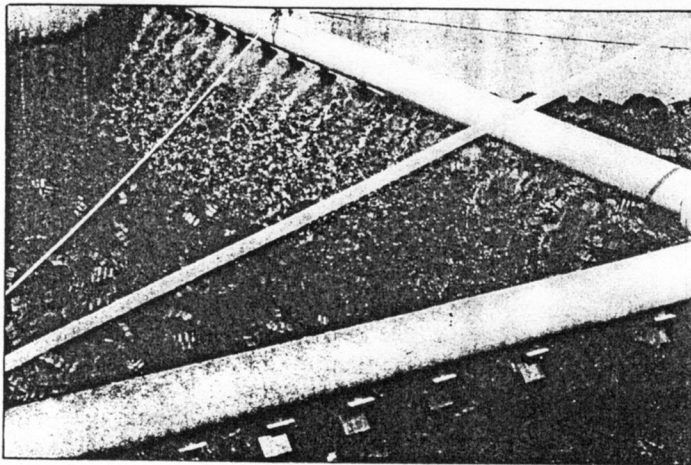


Fig. 6.2. Lecho bacteriano o filtro percolador

Así, en general, medios soportes de gran superficie específica producen superficies específicas de biopelícula entre 88 y 105  $m^2/m^3$  para procesos de eliminación de DBO y entre 135 y 150  $m^2/m^3$  en procesos de nitrificación. En general, cuanto mayor es la carga orgánica aplicada mayores tienen que ser las dimensiones de los huecos o intersticios dado que las biopelículas que se producirán tendrán mayores espesores. A la vez, la

chos bacterianos de desbaste que los de flujo cruzado o inclinado. En el otro extremo, cuando se pretende hacer aplicaciones en el campo de la nitrificación, las cargas serán bajas y los espesores de biopelícula pequeños, con lo que se pueden utilizar medios soportes de mayor superficie específica y menores dimensiones de los huecos (Tabla 6.1).

### 6.2.2. Depósito

La función principal del depósito es la retención o contención del medio soporte para formar así el lecho. El lecho bacteriano debe funcionar aireado y no saturado de agua, por lo que las paredes del depósito no necesitarían resistir el empuje del agua, sino solamente el empuje del medio soporte recubierto de biopelícula. Ahora bien, debido a posibles fallos operacionales e incluso para posibilitar ciertas estrategias de explotación, basadas en la inundación del lecho, es conveniente considerar dichos empujes en su diseño. En principio, el depósito puede ir abierto en la parte superior, si bien,

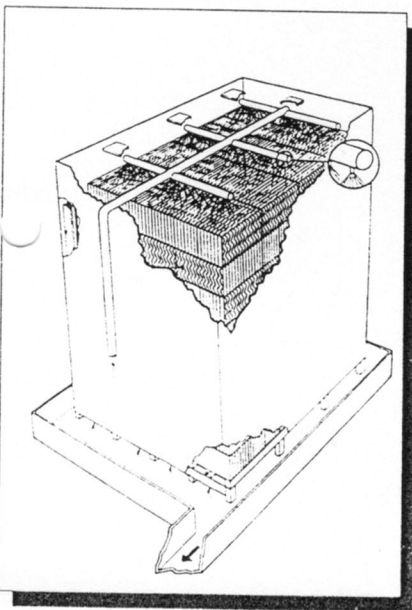


Fig. 6.3. Torres biológicas o biotorres.

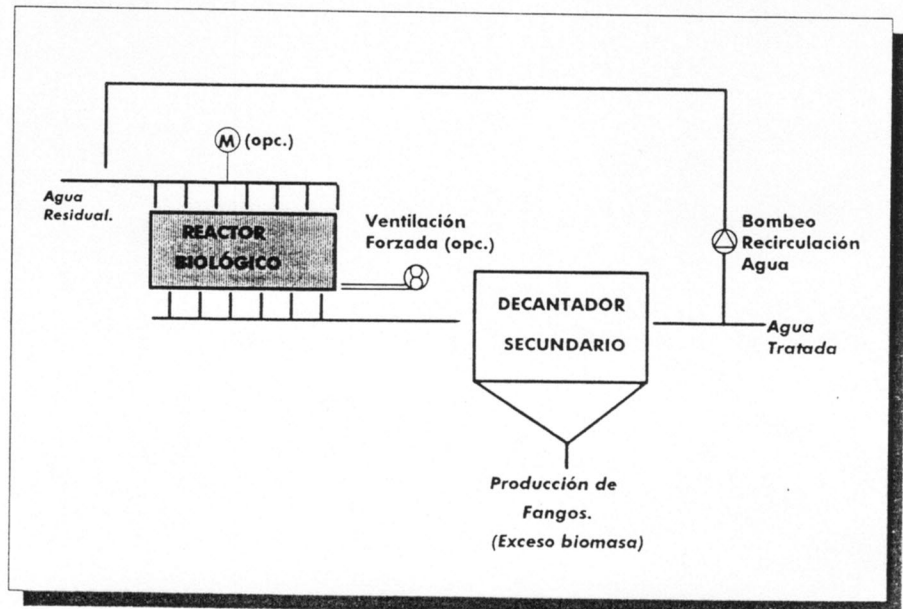


Fig. 6.4. Esquema general de un proceso lechos bacterianos

máximos de tamaños viables están entre 25 y 100 mm.

Es importante destacar, que la superficie específica del medio soporte no necesariamente coincide con la superficie específica de la biopelícula.

configuración del lecho debe de ser de tal manera que permita la fácil evacuación de las biopelículas desprendidas. En este sentido, se considera que los módulos ordenados con tipo de flujo vertical son más idóneos para le-

puede cubrirse con estructuras ligeras de cara a la protección frente a las inclemencias del tiempo, aislamiento térmico, ventilación forzada, control de olores, etc. La forma en planta más generalmente utilizada es la circular,





dada su adaptación a los sistemas de alimentación de agua. No se utilizan diámetros superiores a 60 metros. Se han utilizado también lechos bacterianos de planta cuadrada o rectangular.

### 6.2.3. Alimentación del agua residual

El sistema de alimentación de agua residual al lecho bacteriano debe garantizar la distribución uniforme del caudal en toda la superficie del lecho, así como un caudal suficiente de escorrentamiento o percolación para arrastrar las porciones de biopelícula erosionadas o desprendidas.

Si se pretende realizar una distribución uniforme y continua del caudal de agua residual en una superficie dada, puede ser fácil si el caudal es muy grande en comparación con la superficie. Pero cuando éste no es el caso, como ocurre en los lechos bacterianos, se puede resolver el problema bien aumentando el caudal artificialmente (por ejemplo recirculando el efluente ya tratado) o bien aplicándolo de forma intermitente con lo que se consigue también aumentar el caudal instantáneo en el momento de la aplicación. El control del espesor de la biopelícula y el lavado y arrastre de la biopelícula desprendida se ha controlado tradicionalmente con el parámetro denominado carga hidráulica, es decir, el caudal de paso por el lecho por unidad de superficie del mismo, el cual puede aumentarse artificialmente recirculando el efluente.

Existen fundamentalmente dos sistemas de distribución del agua de alimentación:

A) *Sistema Fijo*, constituido por tuberías y aspersores, utilizado fundamentalmente en lechos bacterianos de planta cuadrada o rectangular. La aplicación del agua residual se puede hacer intermitentemente, mediante depósito de almacenamiento y bombeo del agua residual, o bien de forma continua, mediante recirculación del efluente a tratar.

B) *Sistema Móvil*, constituido por una columna central giratoria, de la que parten brazos radiales en los que van instaladas boquillas para la distribución del agua residual. Insta-

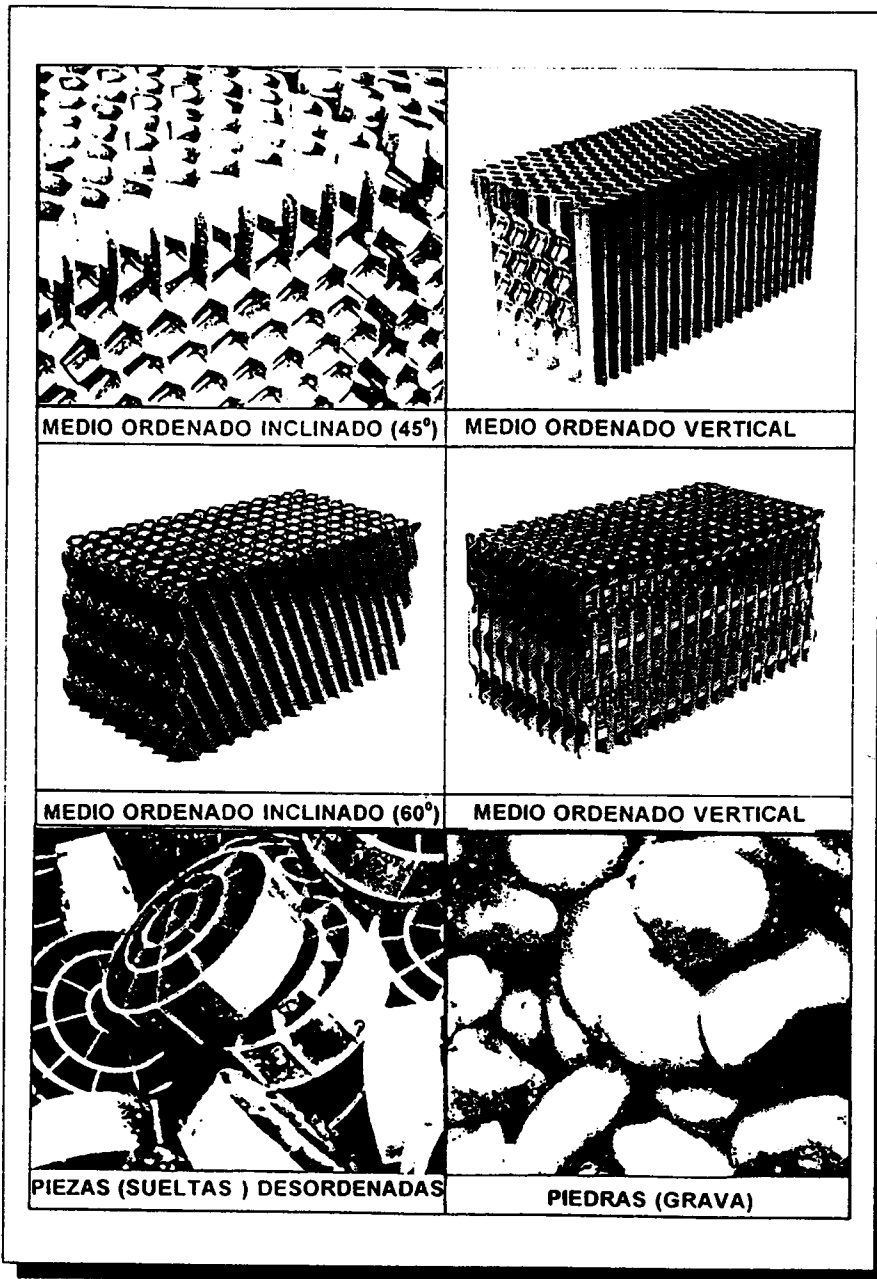


Fig. 6.5. Tipos de medios de soporte para lechos bacterianos.

**Tabla 6.1. Características de los medios soporte para lechos bacterianos.**

TIPO DE MEDIO SOPORTE	TAMAÑO cm	DENSIDAD Kg/m <sup>3</sup>	SUPERFICIE ESPECIFICA m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	INDICE DE HUECOS %	APLICACION (1)
Grava	5-10 2,5-7,5	1440 1600	40 60	60 50	C, CN, N CN, N
Plástico: Piezas desordenadas	Varia Varia	32-64 48-80	85-110 130-140	> 95 > 94	C, CN, N N
Plástico: Módulos ordenados	60x60x120 60x60x120	32-80 64-96	85-110 130-140	> 95 > 94	C, CN, N N

(1): C: Eliminación de DBO carbonosa DBO (C)  
N: Nitrificación. Eliminación de DBO (N)  
CN: Eliminación conjunta de DBO (C) y DBO (N)

lándolo en un lecho bacteriano de planta circular y colocando las boquillas con distanciamiento variable (más próximas cuanto más alejadas del centro) se puede conseguir una distribución uniforme del agua afluente en toda la superficie del lecho bacteriano. Este sistema de distribución produce la aplicación del agua de forma intermitente en cada punto de la superficie del lecho bacteriano. Las boquillas deben colocarse a una altura mínima sobre la superficie del lecho bacteriano para conseguir una óptima distribución del agua aplicada y por debajo de una altura máxima para evitar la erosión y la congelación. Tradicionalmente el número de brazos y la velocidad de giro del sistema se han diseñado para conseguir una aplicación muy frecuente del agua residual: intervalos de riego no superiores a 30 segundos o tiempos de 1 a 5 minutos para un giro completo del sistema. Ha sido tradicional también la utilización del accionamiento hidráulico para producir el movimiento del sistema de distribución rotatorio. Este se consigue por un efecto de acción-reacción al salir el agua de los brazos en el mismo sentido se consigue el movimiento de éstos en sentido contrario.

#### 6.2.4. Salida del agua residual

El medio soporte se coloca sobre un falso fondo drenante, que retiene el material de relleno y permite el paso del agua tratada. La solera del depósito, se hace con pendientes hacia los canales de evacuación de agua tratada. Estos canales, pueden ser diámetros en el lecho o bien periféricos. En este último caso la pared del depósito tiene ventanas o huecos en su base en toda la periferia para permitir la salida del agua al canal perimetral y a la vez permitir la ventilación del lecho.

#### 6.2.5. Ventilación

Al no saturarse o inundarse el lecho queda aire en los intersticios y por lo tanto la ventilación es viable. Tradicionalmente, se ha utilizado un sistema de ventilación natural, basado en

el tiro natural o efecto chimenea producido por la diferencia de temperatura entre el aire y el agua. Si el agua a tratar estaba más caliente que el aire, ésta calentaba el aire interior del lecho y al perder densidad, éste aire ascendía, provocando la entrada de aire más frío por la parte inferior. Para que esta ventilación natural funcione, es necesario diferencias de temperatura aire-agua superiores a  $\pm 2^\circ\text{C}$  y para que funcione óptimamente superiores a  $\pm 6^\circ\text{C}$ . Por otra parte, en función del tipo de lecho, hay que limitar la altura máxima del mismo para que la resistencia al paso del aire y la pérdida de carga no sean excesivas y permita la ventilación natural descrita.

Hay que indicar que este sistema de ventilación natural es dependiente de las variaciones de la temperatura del agua residual y del aire ambiente, de tal manera que si hay un período en que estas temperaturas coinciden, bien a lo largo del día o en diferentes épocas, la ventilación deja de funcionar, disminuyen los rendimientos del proceso y se producen problemas de funcionamiento como olores, etc.

Otro sistema, históricamente poco utilizado, consiste en la ventilación forzada mediante ventiladores.

### 6.3. Crítica histórica y nuevo enfoque

Históricamente los lechos bacterianos han sido considerados como un proceso biológico que no era capaz de alcanzar muy buenas calidades del efluente. Algunas consideraciones habituales sobre los lechos bacterianos pero que son incorrectas son las siguientes (W.E.F.-ASCE, 1992):

- Los lechos bacterianos son idóneos para obtener calidades de efluente superiores a 30 mg/L de DBO y de SS.
- El efluente de los lechos bacterianos no puede ser tan bueno como el de fangos activos.
- Los lechos bacterianos no eliminan fácilmente la DBO soluble.
- Se produce una gran pérdida de temperatura a través de los lechos bacterianos en climas fríos.
- Los lechos bacterianos no son eficientes procesos de nitrificación.

- La ventilación natural en los lechos bacterianos es adecuada.
- La aplicación del agua residual en los lechos debe dosificarse cada 10 a 60 segundos.
- La recirculación es necesaria para obtener un funcionamiento óptimo.
- Los ciclos de desprendimiento masivo de biopelícula son normales y no son perjudiciales para su funcionamiento.
- El proceso de lechos bacterianos requiere más terreno que el de fangos activos.

En la realidad, con la tecnología actualmente disponible, los lechos bacterianos pueden ser capaces de conseguir calidades de efluente de menos de 10 mg/L de DBO y SS y de menos de 1 mg/L de nitrógeno amoniacal (NH<sub>4</sub>), con pérdidas de temperatura del agua menores de 1,5 °C y llegando a eliminar prácticamente la producción de moscas en los lechos bacterianos (*Psychoda*, *Anisopus*, etc.) y los desprendimientos masivos de biopelícula, con el correspondiente peligro de atascamiento del lecho y mal funcionamiento. Los elementos fundamentales, en esta nueva concepción de los lechos bacterianos, son la modificación del sistema de alimentación de agua, la adopción de la ventilación forzada y la elección correcta del medio soporte.

Tras la idea tradicional de que la recirculación mejoraba el rendimiento, hoy día se considera que su efecto es mínimo en este sentido y que puede tener importancia para diluir el efluente al lecho (dado que la concentración máxima de DBO entrante al reactor debería ser inferior a 400 mg/L de DBO para evitar el fallo del sistema), para aumentar la humectación del lecho y para aumentar el caudal de arrastre o lavado de la biopelícula.

#### 6.3.1. Alimentación del agua residual

Estudios realizados en los años 1940 y 1950, demostraron que disminuyendo la frecuencia de la dosificación en la alimentación al lecho bacteriano, se conseguía controlar mejor el espesor de la biopelícula, evitando

los desprendimientos masivos de biomasa y se conseguía, también, reducir hasta prácticamente eliminar los desarrollos de moscas en los lechos bacterianos y mejorar el rendimiento de forma importante. Este hecho no ha sido aplicado al diseño de los lechos bacterianos hasta muy recientemente.

Puede analizarse que, si se disminuye la frecuencia de aplicación, el caudal de agua instantáneo que se aplica en cada punto es mucho mayor, con lo que es viable obtener un mayor cortante, de tal manera que sea mayor la erosión sobre la biopelícula y se obtenga un espesor máximo más o menos en equilibrio. Si pretendemos calcular el caudal instantáneo aplicado a un punto de la superficie del lecho, podemos ver, que dicho caudal por el tiempo de la aplicación instantánea debe ser igual al caudal medio de aplicación por unidad de superficie multiplicado por el tiempo total del ciclo de la dosificación. es decir

$$Q \cdot T_i = Q_m \cdot T_c \quad (\text{Ec. 6.1})$$

donde,

$Q_i$  = Caudal instantáneo por unidad de superficie en cada aplicación en un punto dado ( $\text{m}^3/\text{m}^2$ ).

$T_i$  = La duración de la aplicación instantánea (h).

$Q_m$  = El caudal medio de alimentación por unidad de superficie ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$ ), lo que tradicionalmente se denomina carga hidráulica.

$T_c$  = Es la duración del ciclo de aplicación o el tiempo total entre dos aplicaciones sucesivas en un mismo punto del lecho (h).

$$Q_m = Q + R \quad (\text{Ec. 6.2})$$

donde,

$Q$  = Caudal afluente de agua residual por unidad de superficie del lecho ( $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ ).

$R$  = Caudal de recirculación por unidad de superficie del lecho ( $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ ).

La duración del ciclo de aplicación, es decir, el tiempo entre dos aplicaciones sucesivas en un punto dado  $T_c$  será igual al tiempo que tarda

el sistema en dar una vuelta dividido por el número de brazos, es decir

$$T_c = \frac{1}{nb} \quad (\text{Ec. 6.3})$$

donde,

$n$  = La velocidad de giro, en revoluciones por minuto.

$b$  = El número de brazos del sistema de distribución giratoria.

Como el tiempo instantáneo de cada aplicación no puede ser determinado fácilmente, se puede adoptar como parámetro importante el producto de  $Q_i \times T_i$ , que es el volumen instantáneo de cada aplicación, y refleja la tasa de aplicación instantánea o lo que los alemanes llaman la intensidad de lavado (Spülkraft), intensidad de dosificación instantánea o parámetro SK. Esta tasa de aplicación instantánea se puede expresar en milímetros de agua por paso de brazo del sistema de distribución. En resumen:

$$SK = Q_i \cdot T_i = \frac{Q+R \cdot 100}{n \cdot b \cdot 60} \quad (\text{mm/paso}) \quad (\text{Ec. 6.4})$$

Se puede estudiar cuáles son los valores óptimos de la tasa de aplicación instantánea (SK) para obtener los mejores rendimientos del proceso, así como cuáles son los valores óptimos para producir el lavado y control del espesor de la biopelícula. En la tabla adjunta se presentan valores dados por la WEF-ASCE (Tabla 6.2).

Para obtener los valores operacionales del parámetro SK, es necesario, normalmente, motorizar el sistema de distribución giratorio del agua de alimentación, preferiblemente con motor de velocidad variable e incluso automatizarlo mediante temporizaciones (período de operación, período de lavado) completando un ciclo.

### 6.3.2. Ventilación forzada

Con la ventilación forzada se puede garantizar en todo momento el funcionamiento del lecho bacteriano. Para diseño, se suelen considerar suministros de aire que sean capaces de dar 50 kg de oxígeno por cada kg de oxígeno consumido por el reactor.

Por otra parte, la ventilación forzada puede reducir los caudales de aire que pasan por el lecho bacteriano, justamente cuando las diferencias de temperatura son muy grandes, como es en el caso del invierno, que producen el enfriamiento excesivo del agua residual y del lecho.

### 6.4. Análisis teórico

Históricamente se han desarrollado muchas fórmulas para diseñar los lechos bacterianos, es decir para deducir el rendimiento. Así, hay que destacar las propuestas por «Ten States Standards, USA», NRC (National Research Council, USA), Velz, Schulze, «British Manual of Practice», Germanin; Eckenfelder; Gallery Gotai; Kin-cannon, y Stoner e incluso se ha desarrollado un modelo matemático de simulación por Logon.

A continuación se desarrolla de una forma teórica, pero aproximada un modelo del funcionamiento del proceso descrito.

El lecho bacteriano se caracteriza por su flujo en pistón, lo que hace que las concentraciones de sustrato disminuyan en profundidad, según el agua va atravesando el lecho. Por ello, de cara a obtener un modelo de simulación de su funcionamiento, se plantea el realizar un balance de masas en una capa horizontal del mismo (Fig. 6.6).

**Tabla 6.2. Valores sugeridos de la tasa de aplicación instantánea (SK) en lechos bacterianos.**

CARGA ORGANICA Kg/m <sup>2</sup> día	SK OPTIMO DE DEPURACION mm/paso	SK PARA LAVADO PERIODICO mm/paso
0,25	10-100	≥ 200
0,5	15-150	≥ 200
1,0	30-200	≥ 300
2,0	40-250	≥ 400
3,0	60-300	≥ 600
4,0	80-400	≥ 800

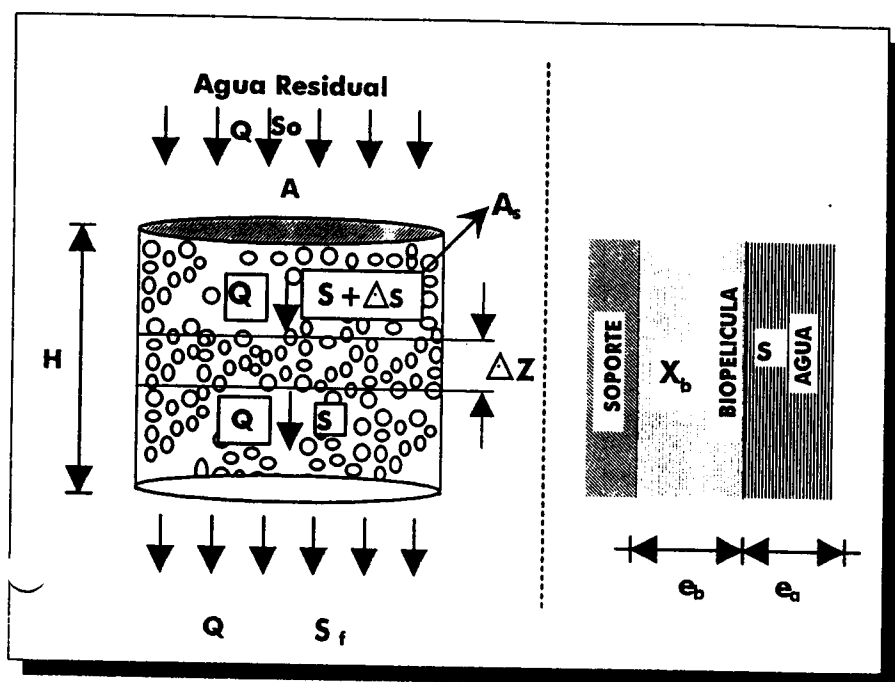


Fig. 6.6. Análisis funcional del lecho bacteriano.

Balace de masas en una capa:

$$Q(S + \Delta S) - QS = \Delta V_{ag} \frac{ds}{dt} \quad (\text{Ec. 6.5})$$

donde:

- Q = Caudal de agua a través del lecho.
- S = Concentración de sustrato.
- t = Tiempo.
- $\Delta V_{ag}$  = Volumen de agua en la capa o rebanada en estudio.

La reacción de eliminación de sustrato puede ser aproximada por el modelo de Monod.

$$\frac{ds}{dt} = \frac{k \cdot X \cdot S}{K_s + S} \quad (\text{Ec. 6.6})$$

Haciendo la aproximación de que toda biomasa de la biopelícula está en contacto con el sustrato del agua. es decir, calculando la concentración equivalente de biomasa en el seno del agua con concentración de sustrato «s», o lo que es lo mismo, la concentración de biopelícula respecto al agua fluyente,

$$\bar{X} = \frac{x_b e_b}{e_a} \quad (\text{Ec. 6.7})$$

En el caso en que se pretende obtener bajas concentraciones de sustra-

to, es decir, si  $S \ll K_s$ , la ecuación de Monod se puede simplificar a:

$$\frac{ds}{dt} = - \frac{k}{K_s} X S \quad (\text{Ec. 6.8})$$

Tischler y Grau *et al.* (Eckenfelder, 1980) indican que la constante  $K/K_s$ , está influida por la concentración del sustrato de la alimentación  $S_0$ , de la siguiente forma

$$\frac{k}{K_s} = \frac{K_1}{S_0} \quad (\text{Ec. 6.9})$$

Calculando  $\Delta V_{ag}$  de la figura, se tiene:

$$\Delta V_{ag} = A \cdot \Delta z \cdot A_s \cdot e_a \quad (\text{Ec. 6.10})$$

Sustituyendo las últimas expresiones, en la ecuación de balance

$$Q \Delta S = - A \cdot \Delta z \cdot A_s \cdot e_a \cdot \frac{K_1}{S_0} \cdot x_b \cdot \frac{e_b}{e_a} \cdot S \quad (\text{Ec. 6.11})$$

Llevando al límite e integrando en  $z = 0$  y  $z = H$ ,  $S = S_0$  y  $S = S_f$ , se tiene

$$\int_{S_0}^{S_f} \frac{dS}{S} = - \int_0^H \frac{A_s}{Q} \cdot \frac{K_1}{S_0} \cdot x_b e_b dz \quad (\text{Ec. 6.12})$$

Si suponemos que  $x_b e_b$  es aproximadamente constante para todo el lecho, lo cual puede ser posible al considerar el espesor activo, y adoptando como nueva constante  $K_2 = k_1 x_b e_b$

$$\frac{S_f}{S_0} = e^{-K_2 A_s \frac{AH}{QS_0}} \quad (\text{Ec. 6.13})$$

o bien:

$$\frac{S_f}{S_0} = e^{-\frac{K_2 A_s}{CO}} \quad (\text{Ec. 6.14})$$

donde:

$$CO = \frac{Q S_0}{AH} \quad (\text{Ec. 6.15})$$

CO = Carga orgánica aplicada por unidad de volumen del lecho.

Según esto, los siguientes parámetros influirán en el funcionamiento del proceso a través de la carga orgánica: carga hidráulica =  $Q/A$ ; la altura del lecho H, y la concentración de sustrato afluente,  $S_0$ . Además, la carga hidráulica influirá en el control del espesor de la biopelícula. En este sentido hay que considerar que la recirculación influye en la carga hidráulica.

## 6.5. Diseño

Los procesos de lechos bacterianos aplicados a la eliminación de DBO carbonosa tradicionalmente se han clasificado en función de la carga: baja, media, alta, muy alta y de desbaste. Sus características funcionales y de diseño se aprecian en la tabla adjunta (Tabla 6.3).

La producción de fangos o exceso de biomasa es mayor a mayor carga. Así; para baja carga, el fango producido está muy mineralizado y se produce en bajas cantidades por lo que puede ser admisible incluso su arrastre por el efluente del lecho, lo que puede hacer innecesaria la decantación secundaria. Para media carga la producción de fangos es del orden de 0,2 kg SSV/Kg de DBO eliminado, en la alta carga del orden de 0,5 kg SSV/Kg de DBO<sub>e</sub>; y para muy alta carga del orden de 0,7 kg SSV/Kg DBO<sub>e</sub>. En todos estos casos es necesaria una decantación secundaria.

**Tabla 6.3. Características funcionales y de diseño de los lechos bacterianos.**

CARACTERÍSTICAS	Baja carga	Media carga	Alta carga	Muy alta carga	De desbaste
Carga hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h) (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d)	1-3.7	3.7-9.4	0.4-1.5	0.6-3.6*	2.4-7.2
Carga orgánica (kg/m <sup>3</sup> .d)	0.08-0.4	0.24-0.48	0.4-4.8	Hasta 4.8	1.6**
Recirculación	Mínima	Habitual	Siempre	Habitual	No se requiere habitualmente
Moscas	Abundantes	Variables	Variables	Escasos	Escasos
Desprendimiento	Intermitente	Variable	Continuo	Continuo	Continuo
Altura (m)	1.8-2.4	1.8-2.4	0.9-2.4	Hasta 12.2	1.8-6
Eliminación DBO (%)	80-85	50-70	65-80	65-85	40-85
Calidad del efluente	Bien nitrificado	Alguna nitrificación**	Alguna nitrificación**	Nitrificación limitada	Sin nitrificación
Medio soporte típico	Piedras	Piedras	Piedras	Plástico	Piedras/Plást.

\* No incluye la recirculación.

\*\* La nitrificación se produce con mayor probabilidad en un sistema de dos etapas que en una etapa única.

## 7. BIODISCOS

### 7.1. Descripción

El proceso de biodiscos consta, como casi todos los procesos de tratamiento biológico de aguas residuales, de un reactor y de un decantador secundario. A su vez, el reactor está constituido por un depósito de nivel constante por el que se hace pasar el agua a tratar. En dicho depósito se coloca un conjunto de discos de plástico dispuestos en paralelo y en posición vertical, que quedan atravesados por un eje horizontal. Dicho eje es accionado por un motor que hace girar el conjunto de discos dejando sumergida en el agua del depósito un 40% de la superficie de los discos. Cada reactor suele disponer de varios conjuntos o paquetes de discos (etapas) dispuestos en serie. Normalmente el depósito con los discos se cubre para evitar los perjuicios que pueden ocasionar las intenciones meteorológicas.

A partir del proceso que se acaba de describir han surgido otros tipos de procesos al sustituir los discos por otros elementos. Así, se han cambiado los paquetes de discos por cilindros rellenos de material plástico de diversas formas. Por ello, hoy día se puede hablar de otros tipos de proce-

tos como son los biocilindros. De una forma general, se pueden englobar todos estos procesos bajo la denominación americana de «contactor biológico rotatorio» o RBC (Rotatory Biological Contactor).

### 7.2. Fundamento

El proceso puede ser clasificado o tipificado como un proceso de tratamiento biológico aerobio de aguas residuales de cultivo fijado a un soporte (procesos biopelícula) en movimien-

to, producido éste por accionamiento mecánico o por aire.

La depuración se lleva a efecto mediante una biocenosis que se fija a los discos de plástico (biopelícula), la cual utiliza la materia orgánica del agua residual (DBO) como sustrato o alimento. La gran cantidad de biomasa existente en los discos es puesta en contacto con el sustrato del agua residual al hacer girar los discos y quedar éstos parcialmente sumergidos. La actividad metabólica de los microorganismos aerobios de la biopelícula exige una aportación constante de oxígeno, el cual es aportado mediante la rotación de los discos, principalmente al entrar éstos en contacto con el aire.

Cuando el proceso está en régimen estacionario el crecimiento de la biomasa es eliminado del sistema por el cortante producido por el giro de los discos y por desprendimientos de biopelícula al perder ésta la adherencia, principalmente por fenómenos anaerobios o de falta de sustrato en las partes más profundas de la misma (en la proximidad del medio soporte). Este exceso de biomasa es decantado y eliminado en el decantador secundario.

Si las condiciones son adecuadas, se pueden dar también fenómenos de nitrificación, que pueden ser muy importantes, especialmente en las últimas etapas del proceso.

### 7.3. Análisis teórico

De cara a deducir los parámetros que, de forma fundamental, regulan

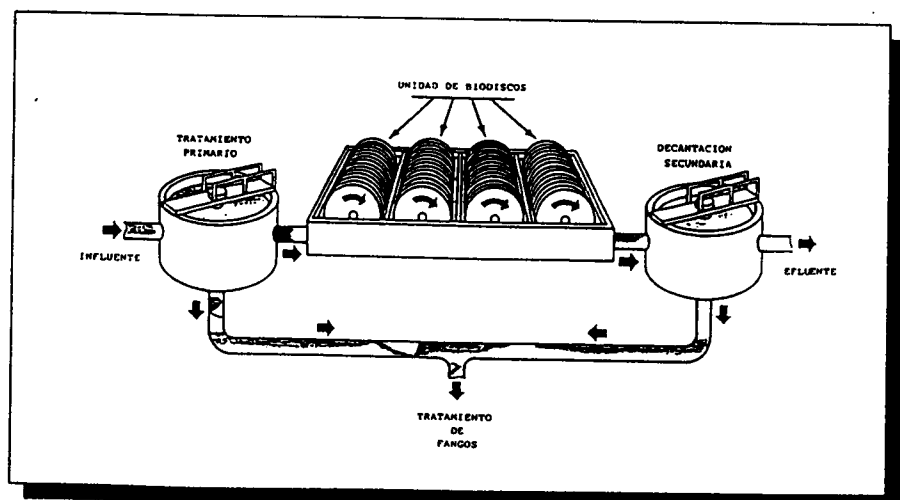


Fig. 7.1. Esquema de un proceso de biodiscos o RBC (García, 1988).

los rendimientos del proceso, se puede hacer un análisis teórico aproximado basándose en el modelo biocinético de Monod.

a) *Carga hidráulica*

Efectuando un balance de masas de sustrato en una etapa de biodiscos se obtiene:

$$Q \cdot S_0 - Q \cdot S = \frac{dS}{dt} \cdot V \quad (\text{Ec. 7.1})$$

Siendo V, el volumen de agua de la etapa del reactor.

Considerando que el sustrato en contacto con la biomasa se encuentra a la misma concentración S (simplificación), se tendrá:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{k \cdot X \cdot S}{K_s + S} \quad (\text{Ec. 7.2})$$

Como aproximación se puede considerar, en este caso, que la concentración de biomasa es igual a la cantidad total de biomasa en los discos de la etapa dividida por el volumen de la etapa, es decir:

$$X = \frac{x \cdot A \cdot e}{V} \quad (\text{Ec. 7.3})$$

donde,

x = La concentración de biomasa en la biopelícula.

e = Espesor de la biopelícula.

A = Superficie total del soporte (o biopelícula).

◊ Simplificando al caso sencillo en que se pretende un alto rendimiento y se cumple que  $S \ll K_s$ , suponiendo que  $x \cdot e$  es constante para el espesor activo de la biopelícula, y agrupando en una nueva constante las anteriores:

$$K_1 = \frac{k \cdot x \cdot e}{K_s} \quad (\text{Ec. 7.4})$$

Se puede obtener a partir de las tres ecuaciones anteriores.

$$Q \cdot (S_0 - S) = K_1 \cdot A \cdot S \quad (\text{Ec. 7.5})$$

De donde:

$$\frac{S}{S_0} = \frac{1}{\left(1 + \frac{K_1}{Q/A}\right)} \quad (\text{Ec. 7.6})$$

Por lo tanto, se concluye que el rendimiento  $(1 - S/S_0)$  del proceso depende fundamentalmente del cociente entre el caudal de agua residual a tratar y la superficie total de los discos o de la biopelícula (o del medio soporte). Dicho parámetro  $(Q/A)$  se denomina carga hidráulica del proceso.

b) *Número de etapas*

Puede verse fácilmente a partir de la ecuación (7.7) que en el caso de varias etapas, para el proceso global quedará:

$$\frac{S}{S_0} = \frac{1}{\left(1 + \frac{K_1}{Q/A}\right)^N} \quad (\text{Ec. 7.7})$$

Es decir, el rendimiento depende también del número de etapas, pero para las aplicaciones habituales a partir de cuatro (4) etapas el aumento del rendimiento no es importante.

c) *Carga orgánica*

Algunos investigadores han encontrado que la constante  $K_1$  depende de la concentración inicial del sustrato, con proporcionalidad inversa:

$$K_1 = \frac{K_2}{S_0} \quad (\text{Ec. 7.8})$$

En este caso, a partir de (Ec. 7.7) se obtiene:

$$\frac{S}{S_0} = \frac{1}{\left(1 + \frac{K_2}{Q \cdot S_0 / A}\right)} \quad (\text{Ec. 7.9})$$

Por lo tanto se puede decir que el rendimiento depende de este nuevo parámetro  $(Q \cdot S_0 / A)$  que se denomina carga orgánica (alimentada o aportada) del proceso.

d) *Velocidad de giro*

Al aumentar la velocidad de giro aumenta la capacidad de aireación del sistema, la probabilidad de contacto sustrato-biomasa, el cortante al que está sometida la biopelícula, y la potencia necesaria para mover los discos. Se limita la velocidad de giro adoptando un valor máximo de la velocidad periférica máxima de los discos.

e) *Tiempo de retención hidráulico en el reactor*

Al aumentar el tiempo de retención el rendimiento del proceso aumenta; pero por encima de un cierto valor dicha mejora no es apreciable. Un parámetro que expresa lo mismo que el tiempo de retención es el volumen específico de reactor, calculado como el volumen de depósito dividido por la superficie total de los discos.

f) *Temperatura*

Para la eliminación de materia orgánica carbonosa sólo se detectan disminuciones del rendimiento cuando la temperatura baja de 12 °C. Sin embargo, cuando se desea la nitrificación el empeoramiento de la misma sucede a partir de los 20 °C.

g) *Oxigenación*

Cada proceso de biodiscos concreto tiene una capacidad de oxigenación máxima, dada por sus características geométricas y su velocidad de giro. La mayor carga orgánica en el proceso se dará en la primera etapa, y puede llegar a sobrepasar la capacidad de oxigenación del sistema. Este hecho puede producir crecimientos excesivos de la biopelícula, anaerobiosis y desprendimiento de biomasa, y crecimiento de microorganismos nocivos al proceso. En consecuencia, además de considerar la carga orgánica global habrá que considerar la carga de la primera etapa, la cual deberá quedar limitada.

h) *Características del agua residual*

Cuando la materia orgánica del agua residual es disuelta (típica de muchas aguas residuales industriales) la eliminación por el proceso se basa en la biocinética clásica. Sin embargo, en el caso de la materia orgánica coloidal (típica en aguas residuales domésticas) su eliminación del seno del agua puede ser más rápida al intervenir fenómenos de coagulación floculación (biofloculación).

## 7.4. Diseño

Como en todos los procesos de depuración de aguas residuales existen

**Tabla 7.1. Parámetros funcionales y de diseño de biodiscos.**

Carga orgánica primera etapa. g DBO5 total/m2 día: g DBO5 disuelto/m2 día:	(31) 30 a 40 (12) 12 a 24
Carga hidráulica m3/m2 día. Eliminación de DBO5 (c): Nitrificación:	0,06 a 0,25 0,04 a 0,07
Número mínimo de etapas. Para DBO5 disuelta en efluente < 25 mg/L: Para DBO5 disuelta en efluente 15 - 25 mg/L: Para DBO5 disuelta en efluente 10 - 15 mg/L: Para DBO5 disuelta en efluente < 10 mg/L:	1 etapa 1 ó 2 etapas 2 ó 3 etapas 3 ó 4 etapas
Superficie específica de los biodiscos. Eliminación de DBO5 (c): Nitrificación:	110 m2/m3 200 m2/m3
Diámetro de los discos:	2 a 3,7 m
Longitud de eje. Total: Con discos:	< 8,2 m < 7,6 m
Volumen específico (m3 tanque/m2 discos):	> 5 L/m2
Superficie sumergida de los discos:	40%
Velocidad de giro de los discos:	1 a 2 r.p.m.
Velocidad periférica máxima de los discos:	0,15 - 0,3 m/s
Espesor del medio soporte:	< 3,6 mm
Dimensiones de los huecos del medio soporte:	13-20 mm
Espesores máximos de biopelícula esperados:	2 - 3 mm
Velocidad ascensional del decantador secundario:	1,35 m/h
Concentración fango decantado:	2 - 5 %
Producción de fangos (Kg SS/Kg DBO5e):	0,4 a 0,5

dos métodos de diseño: uno basado en ensayos en planta piloto para la determinación de las constantes biocinéticas; y otro empírico basado en datos de explotación de procesos de biodiscos tratando aguas residuales urbanas (fundamentalmente domésticas). A continuación se presentan los valores de los parámetros de diseño, la mayoría adoptados por la E.P.A. (Tabla 7.1):

Históricamente se han desarrollado tablas para el cálculo de rendimientos basados en datos empíricos, muchos de ellos por los propios fabricantes.

Benjes, en un estudio de la EPA (USA) desarrolló una ecuación empírica basándose en muchos datos reales, que tiene la siguiente expresión:

$$\frac{S_f}{S_0} = e^{-k \left(\frac{V}{Q}\right)^{0.5}} \quad (\text{Ec. 7.9})$$

donde,

$S_f$  = DBO<sub>5</sub> total del efluente secundario (mg/L).

$S_0$  = DBO<sub>5</sub> total afluente al proceso (mg/L).

$V$  = Volumen del medio soporte (m<sup>3</sup>).

$Q$  = Caudal (m<sup>3</sup>/h).

$K$  = Constante de reacción.

El valor de la constante de reacción, oscila entre 0,85 h<sup>-0.5</sup> para temperaturas superiores a 13 °C y 0,57 h<sup>-0.5</sup> para una temperatura de 5 °C.

En el diseño habría que considerar también (García Cudinach, R., 1992) la necesidad de una decantación primaria previa (o bien un tamizado), la posibilidad de regular el caudal para reducir las grandes variaciones cuando el coeficiente punta sea mayor que 2.5, y los flujos internos de la EDAR.

Además, el diseño del proceso debe considerar ciertas flexibilidades de explotación con el fin de mejorar el funcionamiento y mantenimiento. Entre estas, cabe destacar (WEF-ASCE, 1992):

- Posible aireación suplementaria en sistemas de accionamiento por motor eléctrico para hacer frente a mayores cargas orgánicas de una etapa.
- Medios para eliminar el crecimiento excesivo de biopelículas tales como: aditivos químicos, lavado por agua o aire (arrastré), control de la velocidad de giro, cambio de la velocidad de giro, alternancia de la alimentación.
- Velocidad de giro variable en 1.ª y 2.ª etapa.
- Líneas de tratamiento múltiples.
- Deflectores portátiles entre todas las etapas.
- Control de caudal afluente a cada unidad o línea.
- Sistemas de distribución de flujos controlables, tales como alimentación escalonada.
- Control y medida de caudal de aire a cada eje en sistemas de accionamiento neumático y aireación suplementaria.
- Recirculación del efluente secundario.
- Equipo de medidores de OD en etapas iniciales.
- Accesibilidad a ejes, medio soporte, y otros equipos mecánicos que necesitan inspección, mantenimiento y reemplazamiento o posible eliminación periódica.
- Sistema de vaciados del reactor (necesario).
- Celdas de carga para pesar el conjunto de cada eje (necesario).
- Cuando los RBC se instalan en edificios: ventilación (además de las necesidades de oxígeno del RBC), control de humedad, calefacción y medidas para extraer y reemplazar ejes y medio soporte.

## 7.5. Aplicación

Las ventajas y desventajas del proceso, en especial por comparación con los procesos de fangos activos, pueden resumirse en las siguientes:

- Bajo consumo energético (Ver tabla 7.2).
- Explotación y mantenimiento simple y sencilla.
- Menor volumen del depósito del reactor.
- No existe recirculación de fangos secundarios.
- Menor decantación secundaria, debido a la mejor sedimentabilidad del fango.
- Mayor resistencia a sobrecargas hidráulicas.
- Mayor estabilidad frente a variaciones de caudal y carga.
- Posibilidad de diseñar el proceso con nitrificación.
- No problemas de aerosoles y ruidos.
- Menores problemas de espumas.
- Facilidad de ampliación en el futuro.
- Poca pérdida de carga hidráulica y no recirculación del efluente secundario, en comparación con lechos bacterianos.
- Necesidad de material soporte especial.
- Necesidad de diseño mecánico riguroso.
- Montaje complicado.
- El costo es casi lineal con respecto al caudal.

Este último aspecto es favorable para pequeños caudales pero no así para los grandes (factor escala), en comparación con los sistemas convencionales de depuración de aguas residuales. El punto de cambio de esta situación puede estar en los 200 L/s a 250 L/s (alrededor de los 75.000 habitantes). No obstante en San Francisco y Washington DC se ha aplicado este proceso para caudales superiores a los

2 m<sup>3</sup>/s, al considerar la sencillez de explotación y mantenimiento.

Por otra parte, hay que destacar las posibilidades del proceso para adaptarse a diferentes aplicaciones, como puede ser: Pequeñas depuradoras prefabricadas, depuradoras compactas, facilidad de incorporación a procesos ya existentes. ampliación de depuradoras que han quedado infradimensionadas con mínima utilización de superficie, posibilidad de incorporación de oxígeno puro para aumentar la capacidad de oxigenación del proceso, etc.

## 8. VENTAJAS E INCONVENIENTES

Entre las principales ventajas e inconvenientes de los procesos biopelícula, se pueden destacar:

- Bajo mantenimiento de la instalación.
- Fácil explotación.
- Rapidez de arranque.
- Eliminación de sustrato lentamente desprendible *degradable*
- Tolerancia a variación de carga.
- Tolerancia a variación de temperatura.
- Gran efecto sobre aguas residuales de baja concentración.
- Gran variedad de instalaciones.
- Recirculación de fangos no necesaria.
- Buen rendimiento energético.
- Menor producción de fangos.
- Incontrolabilidad de la biomasa presente.
- La difusión limita de la tasa de depuración.
- Peligro de atascamiento del medio soporte.

## 9. BIBLIOGRAFIA

- AMIEVA, J.J. (1993): *Viabilidad del Proceso BE (Biopelícula Extrai-ble). Aplicación de un RBC (Contactor Biológico Rotativo)*. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. Santander.
- BEZANILLA, J.A. (1993): *Depuración de Aguas Residuales en un Contactor Biológico Rotativo RBC con Alternancia en el Sentido del Flujo*. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. Santander.
- BENJES, H.H.Sr. (1977): *Small community wastewater treatment facilities-biological treatment systems*. U.S. EPA Technol. Transfer, Natl. Seminar, Chicago. III.
- CAPELO, X. (1992): *Proceso Biopelícula de Lecho Aireado Sumergido-Proceso BLAS. Estudio de Viabilidad*. Tesina de Magister. Universidad de Cantabria. Santander.
- CASTILLO DE CASTRO, Pedro (1994): *Depuración de Agua Residual con Salinidad Variable empleando un RBC*. Tesina de Magister. Universidad de Cantabria. Santander.
- CHARACKLIS, W.G. & MARSHALL K.C. (1990): *Biofilms*. John Wiley and Sons. INC.
- CHARACKLIS, W.G & WILDERER P.A. (1989): *Structure and Function of Biofilms*. A Wiley-Interscience Publication.
- DEGREMONT (1991): *Water Treatment Handbook*. Sixth Edition, Vol. 1 y 2. París.
- ECKENFELDER, W.W. Jr. (1980): *Principles of water quality management*. CBI Publishing Company Inc. Boston.
- EGUIA, E (1991): *Desarrollo de la Biopelícula en Medio Soporte Permeable*. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. Santander.
- GARCIA CUDINACH, R. (1988): «La tecnología de los RBC (Contactores Biológicos Rotativos)». *Tecnología del Agua*, n.º 46, pp. 58-65.
- GARCIA CUDINACH, R. (1992): «El proceso RBC y las recomendaciones de la EPA». *Tecnología del Agua*; n.º 93, pp. 64-68.

Tabla 7.2. Rendimientos energéticos de diversos procesos biológicos.

SISTEMAS DE TRATAMIENTO	Kg DBO <sub>5</sub> elim./Kw. h
Biodiscos	3.5 - 4.5
Sistemas RBC	1.7 - 3.5
Fangos activos media carga	0.7 - 1.5
Aireación prolongada	0.4 - 0.6