

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN AL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS E INDUSTRIALES.

## I.1. Introducción.

El objetivo final de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (E.D.A.R.), es conseguir unos rendimientos de depuración de acuerdo a la legislación vigente con el mínimo coste económico, social y medio ambiental.

Las líneas de tratamiento de una Estación Depuradora de Aguas Urbanas suelen ser las siguientes:

**Pretratamiento:** consiste en una serie de operaciones cuyo objetivo es la eliminación de:

- Sólidos de gran tamaño que llegan a la estación (maderas, trapos, bolsas, etc.), que podrían producir daños en los equipos como bombas, tuberías, válvulas, etc, de los tratamientos posteriores.
- Sólidos en suspensión de alta densidad, fundamentalmente inorgánicos (arena), que podrían acumularse en los equipos de sedimentación primaria o en el reactor biológico del tratamiento secundario, pudiendo producir asimismo un desgaste por abrasión de bombas y tuberías.
- Grasas y aceites.

**Tratamiento Primario:** el objetivo de esta operación es la separación de la materia sedimentable mediante el uso de decantadores. Como consecuencia del pretratamiento, los sólidos en suspensión que llegan a esta etapa están constituidos fundamentalmente de sólidos orgánicos biodegradables. Por lo tanto, el tratamiento primario aporta una parte importante de la reducción de la DBO de la planta (entre un 30 y un 40%).

Por lo general, este tratamiento está constituido únicamente por una sedimentación o clarificación primaria, ayudada por aditivos coagulantes y/o floculantes, que se lleva a cabo en los clarificadores o decantadores primarios, donde se recogen los fangos primarios. Esta etapa está condicionada por las condiciones de espesamiento de los fangos y por la posible producción de anaerobiosis en los fangos decantados.

**Tratamiento Secundario:** el tratamiento biológico o secundario persigue la transformación de la materia orgánica disuelta en sólidos sedimentables que se retiran fácilmente del proceso. Adicionalmente se consigue el atrapamiento de sólidos coloidales y en suspensión. Para ello se aprovecha la actividad de algunos microorganismos que emplean la materia orgánica, contenida en el agua residual, como fuente de energía y materia para las células. La degradación de la materia orgánica sigue el esquema siguiente:

$\text{Materia Orgánica} + \text{Microorganismos} + \text{O}_2 \Rightarrow \text{Microorganismos} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Energía}$
--

Generalmente, el tratamiento secundario está constituido por un reactor biológico aerobio, donde se oxida la materia orgánica, y por uno o varios decantadores secundarios, donde se separan los fangos secundarios del agua.

**Deshidratación de Fangos:** esta operación permite una mejor manipulación de la materia sólida extraída del agua residual. El objetivo es secar los fangos desde el 5-7% al 18-20% de materia seca. Para ello se emplean equipos como filtros de banda centrífugos y se añaden polielectrolitos de alto peso molecular.

**Desinfección:** antes del vertido final, el efluente de la planta de tratamiento ha de ser tratado para eliminar los microorganismos patógenos. Para ello, el método de desinfección más empleado es la cloración, aunque pueden utilizarse ozono o radiación ultravioleta.

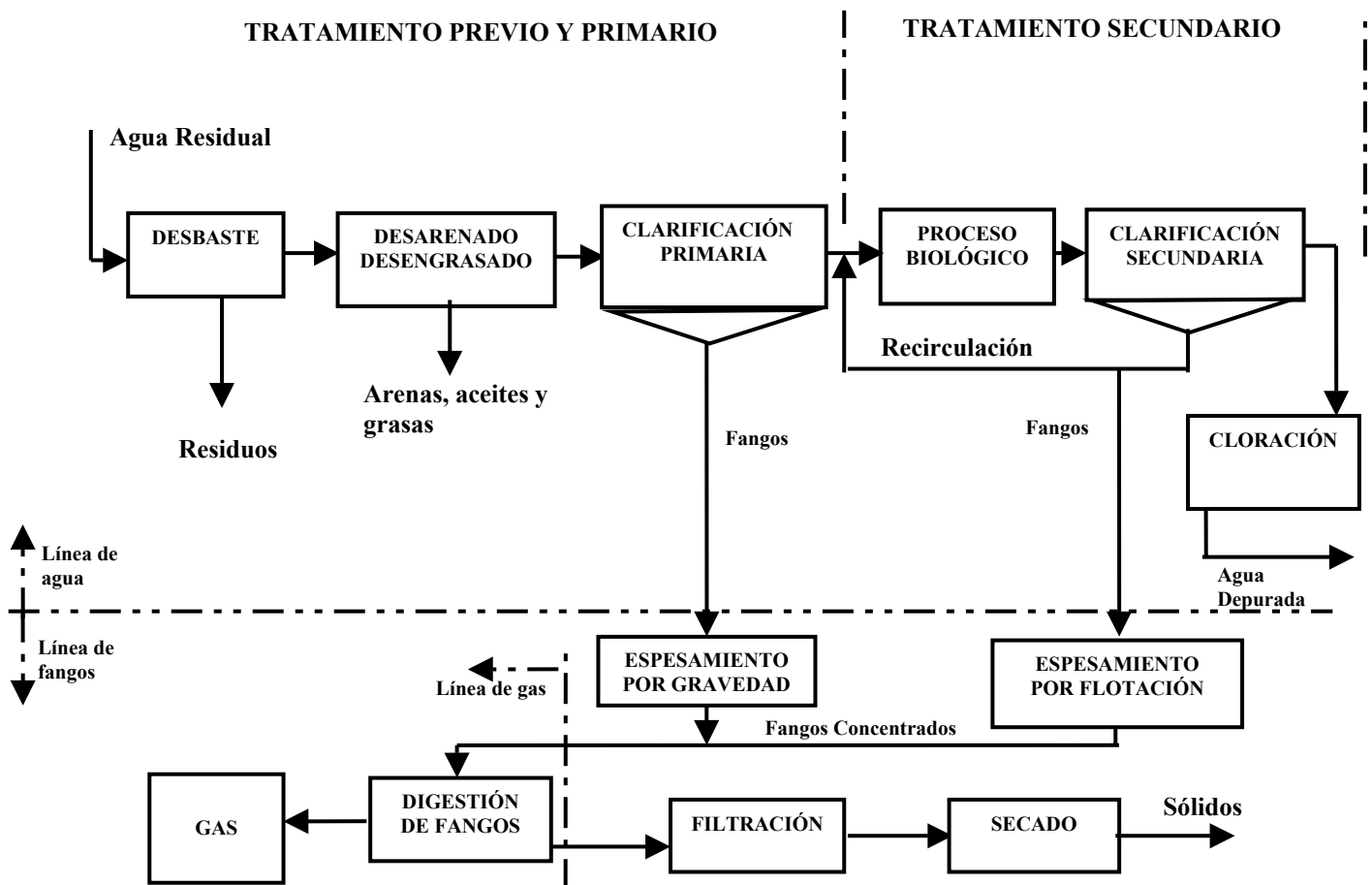


Figura I.1. Esquema básico de una E.D.A.R.

## I.2. El Tratamiento biológico.

En un reactor biológico la materia orgánica presente en el agua residual es fuente de materia y energía para las células, que se multiplican y la degradan en productos finales ya oxidados. Existen fundamentalmente dos tipos de reactores biológicos:

- Sistemas de cultivos fijos.
- Sistemas de cultivos en suspensión, entre los que destaca el proceso de fangos activados.

El objeto de este capítulo es el estudio del segundo tipo, comentándose a continuación los aspectos y conceptos más importantes de la depuración biológica con fangos activados. Como la descripción de las disposiciones más importantes y los procesos biológicos, químicos y físicos que se producen, así como las variables de operación más importantes.

### I.2.1. Reactor biológico de fangos activados.

Un sistema convencional de fangos activados es un reactor aerobio de biomasa en suspensión con un decantador secundario. Puede verse como un reactor continuo con recirculación de biomasa tal y como se muestra en la Figura I.2.

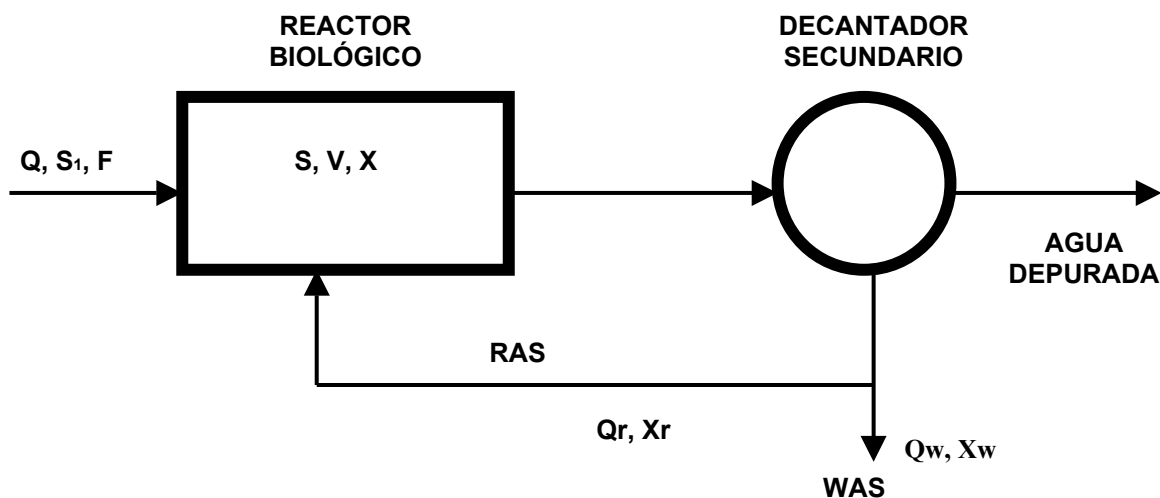


Figura I.2. Esquema de un sistema de fangos activados.

### I.2.2. Parámetros y variables de proceso.

En este apartado se explicarán cuales son los parámetros de proceso más importantes, así como las variables que suelen manipularse para controlar el tratamiento biológico.

En la entrada al reactor, los parámetros fundamentales son:

- **Q**: caudal de entrada y su variación diaria y estacional ( $m^3/d$  o  $m^3/h$ ).
- **S<sub>1</sub>**: concentración de sustrato o materia orgánica expresada como DBO<sub>5</sub> o DQO ( $mg O_2/l$ ). Este sustrato puede clasificarse en distintos grupos como se verá posteriormente.

- **F:** carga orgánica de  $\text{DBO}_5$  o DQO que entra diariamente en el reactor ( $\text{kg O}_2/\text{d}$ ).

En el reactor biológico intervienen los siguientes parámetros:

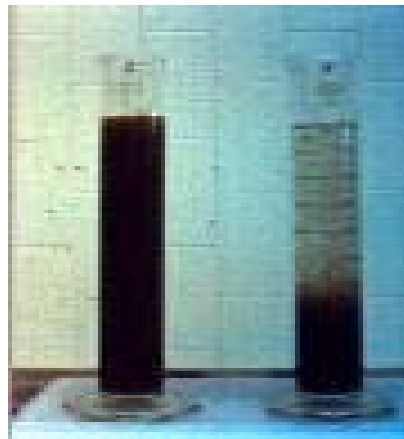
- **V:** volumen del reactor ( $\text{m}^3$ ).
- **X:** concentración de biomasa o fango activado, suele medirse como SSVML (sólidos en suspensión volátiles en el licor mezcla), o como SSLM (sólidos en suspensión en licor mezcla) se mide en  $\text{mg/L}$  o  $\text{g/L}$ .
- **S:** concentración de sustrato en el reactor, suele medirse en términos de DBO o DQO solubles ( $\text{mg O}_2/\text{L}$ ).
- **M:** biomasa total, es decir, masa total de fangos existentes en el reactor biológico, se expresa en  $\text{kg}$  de SSVML o  $\text{kg}$  de SSML.
- **F/M:** denominado carga másica, es la relación entre la carga orgánica diaria y la biomasa presente en el reactor ( $\text{kg de DBO}_5/\text{kg de SSVML} \cdot \text{d}$  o  $\text{kg de DQO}/\text{kg de SSML} \cdot \text{d}$ ).
- **RAS** (Return Activated Sludge): es la recirculación del fango decantado en el decantador secundario.
- **WAS** (Waste Activated Sludge): son los fangos purgados del sistema biológico.
- **Edad del fango, SRT** (Solid Retention Time) o **MCRT** (Mean Cell Residence Time): es la relación entre la biomasa total  $M$  y la biomasa purgada diariamente del sistema. Debe purgarse diariamente la misma cantidad de fangos que se producen para mantener constante la biomasa. La edad de fango se expresa en días.
- **pH:** debe mantenerse en un rango apropiado para las bacterias (6,5-8).
- **Temperatura:** la actividad de los microorganismos está influenciada por la temperatura. Los sistemas biológicos aerobios trabajan con floras bacterianas mesófilas y por tanto la temperatura deba estar en el rango de 15 a 35 °C. Normalmente la temperatura del reactor es algo superior a la temperatura media del agua de entrada debido al calor disipado por la actividad metabólica como consecuencia de la oxidación biológica de la materia orgánica.
- **Nutrientes :** dado que en un reactor biológico se está formando biomasa a expensas del agua residual, y que para la formación de la biomasa es necesario un equilibrio entre la fuente de carbono ( $\text{DBO}_5$  o DQO), el nitrógeno y el fósforo, debe controlarse que el agua de entrada al reactor biológico mantenga dicho equilibrio. La relación adecuada de  $\text{DBO}_5$ : N: P es aproximadamente 100: 5: 1. El nitrógeno se suele expresar como nitrógeno total Kjeldahl (NTK), y el fósforo como fósforo total, aunque algunos autores consideran solamente los ortofosfatos. Normalmente las aguas residuales urbanas no suelen tener déficit de nutrientes, mientras que las industriales pueden tener déficit de nitrógeno, de fósforo o de ambos. El ajuste en la dosificación de nutrientes debe realizarse dosificando la cantidad teórica más alta e ir disminuyéndose hasta observar un descenso en el rendimiento de depuración o la proliferación de algún tipo de microorganismo filamentosos.
- **O.D.:** es la concentración de oxígeno disuelto. Es un parámetro muy importante en la operación de los sistemas aerobios, su control es fundamental para el buen funcionamiento de estos sistemas de depuración.
- **OUR/SOUR:** las tasas de respiración OUR (Oxygen Uptake Rate) y SOUR (Specific Oxygen Uptake Rate), indican la velocidad de consumo del oxígeno en el reactor. OUR se expresa como  $\text{mg O}_2/\text{L} \cdot \text{h}$  y SOUR como  $\text{mg O}_2/\text{g SSVLM} \cdot \text{h}$ . Estos factores son muy empleados en el diseño del reactor y dan una idea de la biodegradabilidad del agua y de la actividad del fango. Pueden ser buenos indicadores en los casos en los que se produzca "shock tóxico" o si se está produciendo la cloración del fango.
- **HRT** (Hydraulic Retention Time): el tiempo de retención hidráulico es el tiempo medio que el agua pasa en el reactor.

Otros parámetros del reactor son:

- Mezcla del medio: es importante que las bacterias y la materia orgánica estén bien mezcladas.
- Tipo de fango alimentado.
- Alcalinidad
- Contenido en ácidos volátiles.
- Contenido en oligoelementos.
- Existencia de componentes tóxicos.

Los parámetros que definen la sedimentabilidad del fango son:

- $V_{30}$ : es el volumen que ocupa el fango cuando un litro de muestra del reactor es decantado durante 30 minutos (Figura I.3). Aunque este parámetro es dependiente de los sólidos en suspensión, es un indicador inmediato de si el fango es compacto y decantará bien, o si por el contrario comienza a abultarse. Se mide en mL/L.



**Figura I.3. Probetas de ensayo de  $V_{30}$ .**

- **IVF** (Índice Volumétrico de Fangos): es el volumen que ocupa 1g de fango. En general se establece que el IVF no debe superar el valor de 150; sin embargo, es difícil precisar un valor por encima del cual pueda producirse pérdida de fango, ya que la eficiencia de un decantador secundario depende también de factores geométricos del decantador, de la composición del efluente, de los sólidos en suspensión, etc. Se mide en mL/g.

Las variables que suelen manipularse en el proceso de fangos activos son:

- Caudal de fangos recirculados (R.A.S.).
- Caudal de purga de fangos (W.A.S.), en la práctica este caudal se emplea más en el control que el anterior por ser una variable más sencilla de manipular. Su variación se emplea en el control de la población de microorganismos, debido a que puede controlarse la edad de fangos, la carga másica, la concentración en el reactor o el lecho de fango en el

decantador secundario. La purga de fangos suele realizarse en la corriente de recirculación del fango.

- Oxígeno disuelto, su control es necesario para mantener el cultivo bajo las condiciones de operación deseadas. Suele realizarse mediante la variación de la velocidad de los equipos de impulsión de aire.

### I.2.3. Tipología de los reactores de fangos activados.

En este apartado se enumerarán y se hará una breve descripción de los distintos tipos de reactores biológicos empleados en las plantas de tratamiento biológico de aguas residuales:

- Reactores discontinuos: son los primeros reactores que se desarrollaron, si bien la evolución hacia el modelo de flujo continuo fue rápida. A finales de la década de los 70 volvieron a aparecer bajo la denominación de reactores secuenciales de flujo discontinuo (S.B.R.).

- Reactores de flujo continuo y mezcla completa: este tipo de reactores se caracteriza por la homogeneidad en la distribución del sustrato y de la comunidad microbiana, así como de la inexistencia de un gradiente de carga. La Figura I.4. muestra esquemas de dicha configuración.

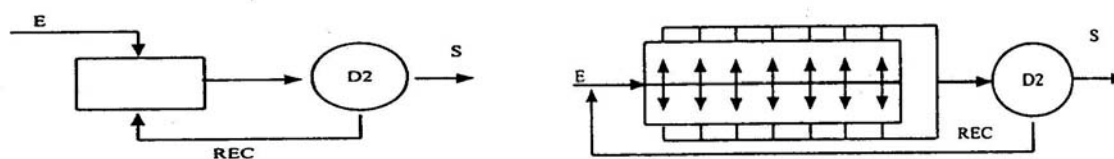


Figura I.4. Esquemas de reactores de mezcla completa.

- Reactores de flujo continuo en flujo de pistón: caracterizados por un gradiente longitudinal en el que evolucionan las necesidades de oxígeno y sustrato, así como las comunidades de microorganismos. Este gradiente de oxígeno y sustrato produce una presión selectiva sobre los microorganismos que suele ser favorable a las bacterias formadoras de flóculos. La Figura I.5. muestra el esquema básico de un reactor de flujo de pistón.

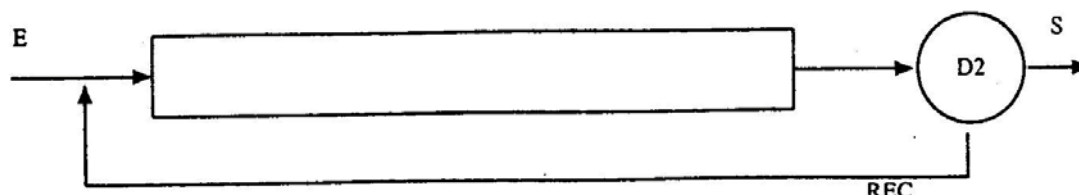
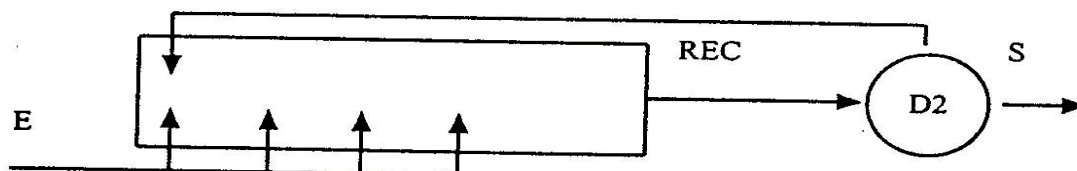


Figura I.5. Esquema de reactor de flujo de pistón.

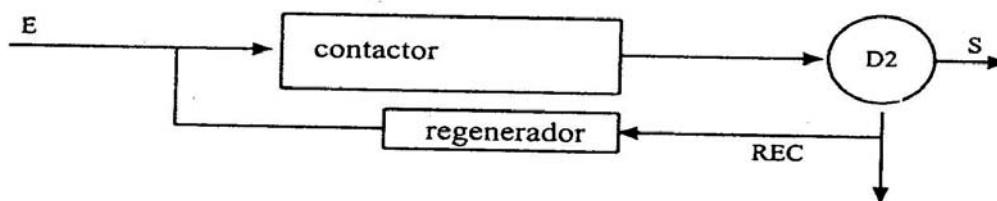
- Reactor de alimentación escalonada: se desarrollan para conseguir un reactor con niveles de oxígeno similares a lo largo del mismo. Al mismo tiempo se desarrollan otras

modificaciones al reactor de flujo de pistón como la aireación escalonada, la recirculación escalonada, etc. Dichas modificaciones supusieron un paso atrás en la lucha contra el crecimiento de las bacterias filamentosas. La Figura I.6. muestra el esquema de dicha configuración.



**Figura I.6. Esquema de alimentación escalonada.**

- Reactor de contacto-estabilización: se basa en la utilización de dos reactores, en el primero (contactor) se produce la absorción del sustrato particulado (biosorción) y la formación de sustancias de reserva en las células a partir del sustrato soluble. En el segundo reactor (regenerador) los sustratos particulados se hidrolizan y se emplean las sustancias de reserva. La Figura I.7. muestra el esquema de dicha configuración.



**Figura I.7. Esquema del proceso Contacto-estabilización.**

- Procesos de doble etapa: se caracterizan por la división del proceso en dos etapas en las cuales se producen biocenosis muy diferentes. Entre los esquemas más empleados destaca el A-B, que emplea dos etapas de fangos activados; la primera etapa se caracteriza por una elevada carga orgánica y bajos tiempos de retención, en la segunda etapa las cargas son menores y el tiempo de retención mayor. Este tipo de disposición puede emplear cultivo fijo en una o en ambas etapas. La Figura I.8. muestra el esquema de dicha configuración.

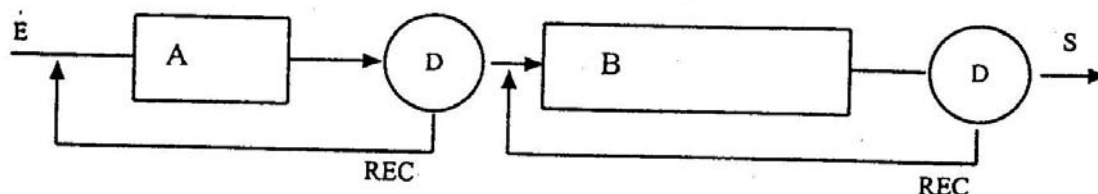


Figura I.8. Esquema de doble etapa.

- Reactores en canal: se caracterizan por tener un flujo de pistón muy acusado y por la alternancia de ambientes al pasar por zonas de agitación y de aireación. Ejemplos de esta disposición son los canales de oxidación y el proceso Carrousel. La Figura I.9. muestra los esquemas de dichas configuraciones.

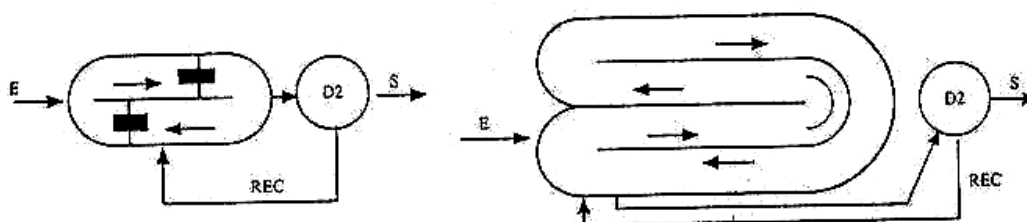


Figura I.9. Esquema de dique y de Carrousel.

#### I.2.4. Clasificación de la materia orgánica.

Como ya se ha visto, el tratamiento biológico elimina parte de los sólidos no sedimentables y la materia orgánica soluble. Es importante realizar una clasificación de la carga orgánica con la que se alimenta al reactor ya que, como se verá posteriormente, la degradación de los distintos tipos de materia orgánica difiere en función de la accesibilidad de las células a dicha materia.

La materia orgánica carbonosa puede expresarse de distintas maneras<sup>(38)</sup>:

- **D.B.O<sub>5</sub>** (Demanda Bioquímica de Oxígeno en 5 días), trata de simular el efecto que los residuos pueden tener sobre el nivel de oxígeno disuelto en una corriente. Una de las ventajas del análisis de DBO<sub>5</sub> es que se trata del ensayo que mejor simula las condiciones de una instalación de tratamiento de aguas residuales. El análisis se realiza con una muestra de agua en la que se introduce una población de microorganismos capaz de oxidar las sustancias orgánicas presentes en la muestra, además deben introducirse una serie de nutrientes (fósforo, magnesio, calcio e hierro) para favorecer el crecimiento de dichos microorganismos. Se mide el oxígeno disuelto en la muestra y tras un período de incubación de cinco días se vuelve a realizar la medida del oxígeno disuelto. La diferencia entre ambos valores es la DBO<sub>5</sub>. En la práctica, además de las bacterias, existen ciertas materias inorgánicas como sulfuros y ciertas formas reducidas de nitrógeno que pueden contribuir al valor de la DBO<sub>5</sub>. Al mismo tiempo, la muestra puede contener sustancias tóxicas que inhiban o retarden la actividad bacteriana. Las principales desventajas de este tipo de medida son:



- La baja reproducibilidad del ensayo, debido al margen de error humano (preparación de muestras, elevado número de reactivos: gérmenes de bacterias, tampones para pH, inhibidores de nitrificación, nutrientes, etc) y a la mala aclimatación de las bacterias en los ambientes de las probetas de ensayo.

- El elevado tiempo de ensayo, que impide su utilidad para permitir un control de la corriente de tratamiento.

- **C.O.T.** ( Carbono Orgánico Total), surgió en la década de los 70 como alternativa a los métodos clásicos de medida (D.B.O<sub>5</sub> y D.Q.O.). Se basa en la combustión de la muestra a 900°C y en la medida posterior del CO<sub>2</sub> producido mediante detectores de infrarrojos. Sus ventajas principales son el bajo tiempo de análisis y la no interferencia de sustancias como sulfuros y nitratos.

- **D.Q.O.** ( Demanda Química de Oxígeno), los valores de DQO son mayores que los de DBO<sub>5</sub> debido a que se realiza una oxidación más rigurosa. El análisis se basa en el reflujo de una muestra con un excedente de dicromato potásico y en la posterior determinación del dicromato potásico no reducido. De cara al balance de materia orgánica en un tratamiento biológico, la medida más adecuada es la de D.Q.O., debido a que en los sistemas aerobios la reducción neta de DQO es igual al oxígeno consumido o utilizado para la degradación de la materia orgánica, por lo que midiendo ambos parámetros (DQO y oxígeno consumido) se puede cerrar el balance de materia carbonosa.

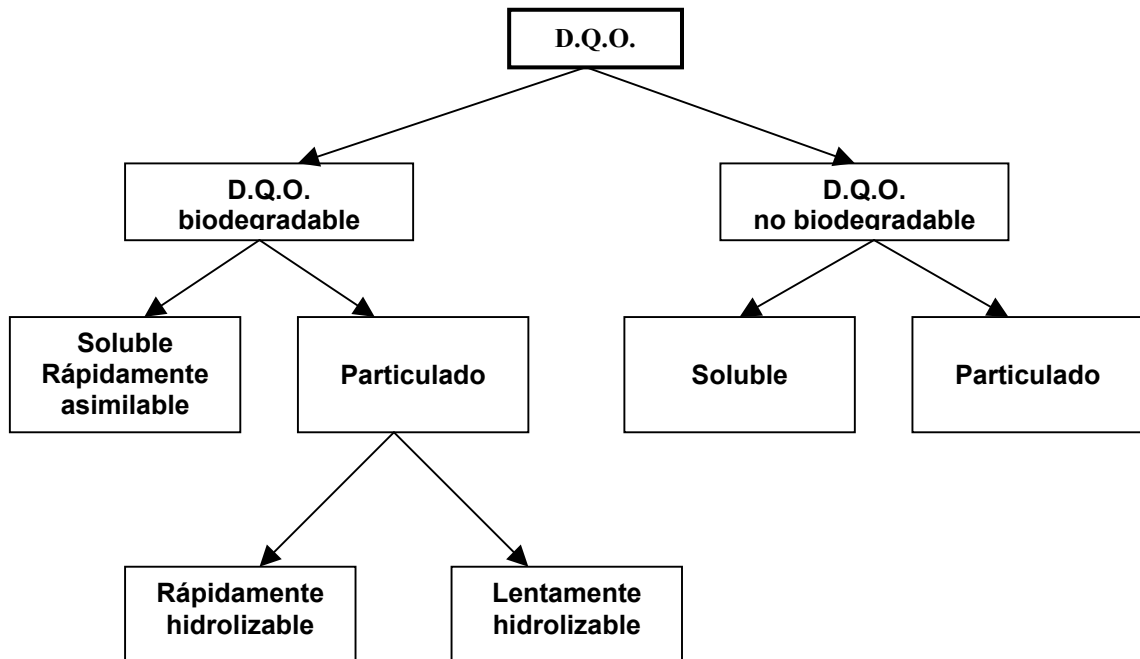
Por lo tanto, la forma habitual de caracterizar la materia orgánica de las aguas residuales es la D.Q.O. y su clasificación se muestra en la Figura I.10. En función de dicha clasificación se establecen los diferentes procesos que sufre cada una de las diferentes partes que integran la DQO:

- Los sustratos rápidamente asimilables son compuestos con un peso molecular bajo, como hidratos de carbono monoméricos, ácidos grasos volátiles, aminoácidos o alcoholes. Estos sustratos pueden ser absorbidos directamente por las células y ser metabolizados.

- Los sustratos particulados biodegradables presentan tamaños desde coloidales hasta sólidos en suspensión, necesitan una hidrólisis previa realizada por enzimas exocelulares. Tras esta hidrólisis, se obtienen compuestos que pueden penetrar a través de la membrana celular. La clasificación de rápida o lentamente hidrolizables se realiza en función del tiempo que tarda en producirse la hidrólisis.

- Los sustratos solubles no biodegradables, no son asimilados por los microorganismos y salen con el efluente depurado.

- Los sustratos particulados no biodegradables suelen ser absorbidos por los flóculos y se eliminan con la purga del fango.



**Figura I.10. Clasificación de la D.Q.O.**

### **I.2.5. Comunidad microbiana.**

La depuración biológica por fangos activados se basa en la asimilación y metabolización de la materia orgánica por ciertos microorganismos. Los microorganismos encargados de realizar este proceso son bacterias heterótrofas y formadoras de flóculo. Heterótrofas porque obtienen el carbono celular del carbono orgánico, al mismo tiempo que obtienen la energía para la síntesis celular de la oxidación y fermentación de la materia orgánica. Estas bacterias se caracterizan también por la formación de colonias que junto a otros microorganismos forman los flóculos, dichos flóculos tienen tamaños lo suficientemente grandes como para sedimentar en el decantador que sigue al reactor biológico.

Además de estas bacterias, en el reactor coexisten otros tipos de microorganismos:

- Bacterias filamentosas, que como se verá más adelante pueden ser perjudiciales para la depuración del agua.
- Hongos, cuya capacidad para sobrevivir en ambientes con pH bajo y bajas concentraciones de nitrógeno los hace importantes en el tratamiento de algunas aguas residuales industriales.
- Algas, que proporcionan oxígeno en los tanques de oxidación.
- Protozoos, que consumen bacterias y pueden emplearse como purificadores de efluentes biológicos.
- Rotíferos, muy eficaces en el consumo de bacterias dispersas y floculadas.

Como puede observarse en la siguiente Figura I.11, los tipos de organismos presentes en el reactor así como las cantidades de cada uno de ellos, estarán condicionados por diversos parámetros de operación como carga másica, edad de fango, concentración del sustrato, temperatura, pH, etc.

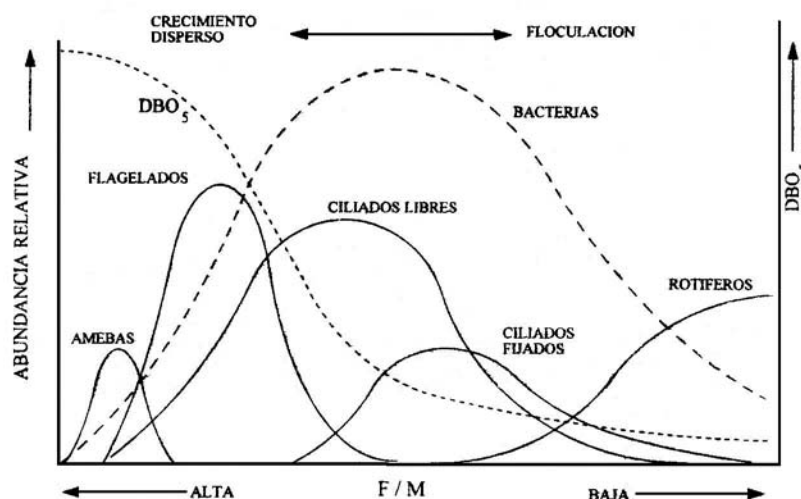


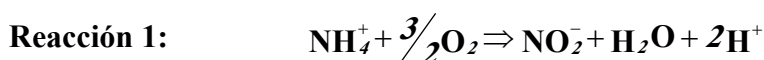
Figura I.11. Abundancia relativa de distintos organismos para distintos valores de DBO<sub>5</sub> y carga másica (F/M).

### I.2.6. Eliminación biológica de nutrientes.

Otra de las aplicaciones de la depuración de aguas con fangos activados es la eliminación de nutrientes. Los nutrientes con mayor importancia en este proceso son los derivados del nitrógeno, además, se contempla la eliminación de las formas de fósforo aunque la importancia relativa respecto al nitrógeno es menor. A continuación se describen estos procesos de eliminación:

- **Nitrificación:** es el proceso biológico de conversión de amonio a nitrito y nitrato. Se realiza mediante una oxidación prolongada del licor mezcla en ambiente aerobio y tras la eliminación de materia orgánica. Es llevada a cabo por un reducido grupo de microorganismos autótrofos, es decir, aquellos que obtienen su carbono celular del CO<sub>2</sub>. El proceso de nitrificación se produce en dos etapas:

· La primera etapa es la oxidación del amonio a nitrito llevada a cabo por un grupo de bacterias autótrofas denominadas Nitrosomas según la Reacción 1:



· La segunda etapa es la oxidación de nitrito a nitrato llevada a cabo por otro tipo de microorganismos denominados Nitrobacter según la Reacción 2:



Si bien la oxidación de nitrato a nitrito se produce en una sola etapa, la oxidación de amonio a nitrito se produce en varias etapas, algunas parcialmente desconocidas.

Una de las características común a los dos tipos de bacterias que intervienen en el proceso, es su lento crecimiento, debido a los bajos rendimientos energéticos ligados a las oxidaciones del amonio y del nitrito.

La etapa limitante del proceso es la oxidación del amonio, por lo tanto las concentraciones de nitrito en el medio han de ser relativamente bajas.

Los factores que afectan al proceso de nitrificación son fundamentalmente:

- Temperatura: el crecimiento de las bacterias nitrificantes tiene un comportamiento exponencial entre 10 y 22°C.
- Oxígeno: las bacterias nitrificantes son más sensibles a concentraciones bajas de oxígeno que las bacterias heterótrofas; por otro lado, la nitrificación puede desarrollarse en concentraciones muy altas de oxígeno.
- pH: el rango óptimo de pH es de 8-9. La dependencia del pH puede estar ligada al efecto de inhibición de los sustratos  $\text{NH}_3$  y  $\text{HNO}_2$  en altas concentraciones, sobre Nitrosomas y Nitrobacter.

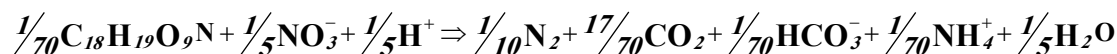
Las condiciones de operación que favorecen el proceso de nitrificación son:

- Concentraciones de oxígeno disuelto elevadas.
- Elevadas edades de fango (en función de la temperatura) por encima de 8-10 días.

- **Desnitrificación:** transformación de  $\text{NO}_3^-$  en nitrógeno gaseoso en presencia de materia carbonosa y en ambiente anóxico en el que el nitrato es el agente oxidante.

La mayor parte de los microorganismos desnitrificantes son facultativos, por lo que en presencia de oxígeno suelen metabolizar los sustratos por la vía del oxígeno en lugar de la vía desnitrificante, debido a la mayor obtención de energía. Dichas bacterias tienen la capacidad de cambiar su metabolismo en función de la presencia o ausencia de oxígeno, utilizando el oxígeno como aceptor de electrones si este está presente, o el nitrato en el caso de que no lo esté.

El proceso de desnitrificación se produce según la **Reacción 3**:



Los factores que afectan a la desnitrificación son fundamentalmente:

- Tipo de sustrato: las bacterias desnitrificantes pueden utilizar un amplio espectro de sustratos orgánicos e incluso inorgánicos como fuentes de energía. El tipo de sustrato condicionará el rendimiento energético de la desnitrificación, siendo el metanol uno de los que aportan mejor rendimiento dada su fácil degradación.
- Temperatura: su influencia se debe a las variaciones en las tasas de crecimiento.
- Oxígeno: su presencia inhibe el desarrollo de la desnitrificación.
- pH: el óptimo se encuentra en el rango 7-9, aunque las condiciones ambientales pueden modificar dicho rango.

- **Acumulación potenciada de fósforo:** se trata de la acumulación de fósforo en el interior de la célula, es llevada a cabo por unas bacterias especiales en ambiente aerobio gracias a la energía que obtienen de sustancias de reserva acumuladas.

- **Relanzamiento del fósforo:** se trata de la liberación de fósforo soluble al licor mezcla a partir de fósforo polimérico acumulado en el interior de las bacterias. Este proceso se realiza simultáneamente a la entrada de formas fácilmente asimilables de carbono que pasan a ser acumuladas como sustancias de reserva. Se necesita ambiente anaerobio.

A modo de síntesis de lo expuesto hasta el momento se pasa a describir brevemente como se elimina la materia orgánica en un sistema de fangos activados.

En el reactor biológico se mezclan el agua residual y el fango que contiene a los microorganismos, parte de la materia orgánica pasa a formar parte de los flóculos por mecanismos físicos, la turbulencia en el reactor y el descenso de los flóculos favorecerán el atrapamiento de las partículas.

La parte fácilmente asimilable se difunde a través de las membranas de las células y es acumulada, dado que la velocidad con que se acumulan es mayor que la velocidad con la que son metabolizados o transformados en sustancias reserva. En este proceso, las condiciones de pH, de contenido en oxígeno, etc, serán fundamentales en la competición de los distintos tipos de microorganismos por la asimilación de materia orgánica, por lo tanto, serán fundamentales para determinar el crecimiento de los distintos tipos de microorganismos.

El efluente del reactor biológico se lleva a un decantador secundario donde los flóculos, que contienen materia orgánica, partículas, bacterias y protozoos decantan. De este clarificador saldrán dos corrientes: una con el agua depurada y otra con los microorganismos decantados. Parte de esta última corriente se recircula al reactor y la otra parte es la purga que permite el control de algunos parámetros como la edad de fangos.

### **I.3. Problemática de los tratamientos biológicos.**

Muchos de los problemas habituales dentro de los sistemas de depuración biológicos, tienen un origen bioquímico y ocasionan disfunciones estructurales o anomalías en la clarificación o en la biomasa del reactor.

Las espumas son el fenómeno bioquímico más importante dentro de las anomalías de la biomasa en el reactor; ya que, si bien pueden provocar el mal funcionamiento de la clarificación si llegan hasta el decantador secundario, tienen un efecto importante sobre el buen funcionamiento del reactor biológico, como el denominado **Floating sludge**, que es un fenómeno caracterizado porque parte del fango se transforma en una espuma muy ligera, que puede visualizarse fácilmente en el reactor biológico, y que no sedimenta en el decantador sino que flota y sale con el efluente depurado. Suelen producirse por la presencia de surfactantes no biodegradables y/o por el desarrollo de microorganismos filamentosos.

Los fenómenos denominados por anomalías en la clarificación, se caracterizan por manifestar su efecto en el decantador secundario. Como se expondrá a continuación, estos fenómenos dan lugar a pérdidas de biomasa en el decantador secundario a través del efluente de agua depurada, lo cual hace que en muchos casos el contenido en materia orgánica de dicho efluente sea inadmisibles desde el punto de vista de los rangos de vertido. Dentro de este grupo de problemas, se establece la siguiente clasificación:

- **Crecimiento disperso:** se produce cuando los microorganismos no forman flóculos y se presentan en pequeñas agrupaciones y/o células individuales.

El crecimiento disperso suele producirse cuando las bacterias no sintetizan el exopolímero (glicocálix) que constituye la matriz gelatinosa (microestructura) necesaria para unirse unas con otras y formar los flóculos. La falta de esta microestructura provoca la formación de agregaciones de bacterias inferiores a  $30\mu\text{m}$ . Las causas principales de la aparición de un problema de crecimiento disperso son:

- Presencia de sustancias tóxicas, de sustancias que inhiban la floculación o de agentes tensioactivos.
- Altas cargas orgánicas y presencia de sustratos rápidamente degradables, debido a que las bacterias organotrofas no se ven obligadas metabólicamente a sintetizar este tipo de productos reserva.
- Presencia de determinados tipos de filamentos y levaduras.

Este fenómeno puede aparecer en las primeras fases de la puesta en marcha de una planta o tras períodos de elevadas pérdidas de biomasa. El crecimiento disperso se caracteriza por un  $\text{IVF} < 30 \text{ mL/g}$  y por la obtención de un efluente turbio debido a que la biomasa no sedimenta en el decantador secundario.

- **Pin-floc, pin point o flóculos en cabeza de alfiler:** se debe a la formación de flóculos pequeños, compactos, débiles y de forma irregularmente esférica.

Este tipo de fenómeno se produce cuando sí se forma la microestructura, pero no la macroestructura, que está formada por microorganismos filamentosos. La microestructura está formada por agregaciones de bacterias floculantes con un tamaño inferior a  $75 \mu\text{m}$ , la ausencia de filamentos impide la unión de estas agregaciones y por tanto el crecimiento de los flóculos. Las principales causas de la aparición de este problema son:

- Desintegración de los flóculos mayores provocada por edades de fango muy elevadas.
- Bajas concentraciones de sustrato que provocan el consumo del exopolímero.
- Desaparición de microorganismos filamentosos y protozoos.
- Turbinas demasiado agresivas.

Este fenómeno suele aparecer en plantas que operan a baja carga y con aireación superficial. El crecimiento disperso se caracteriza por un  $30 < \text{IVF} < 75 \text{ mL/g}$  y por la observación en el decantador de una rápida sedimentación de los flóculos de mayor tamaño y de una lenta sedimentación de los flóculos más pequeños que provoca un efluente turbio y pérdidas de biomasa.

- **Rising sludge:** se debe a la posible desnitrificación que puede producirse en la acumulación de fangos del fondo del decantador, el nitrógeno gaseoso producido se adhiere a los flóculos y provoca la elevación de los fangos sedimentados que produce

pérdidas de biomasa por el efluente del decantador. Suele producirse cuando los tiempos de retención celular son muy elevados, ya que en estas condiciones se desarrollan las bacterias nitrificantes, que transforman el nitrógeno amoniacal en nitrato. Durante la sedimentación y en ausencia de oxígeno, las bacterias desnitrificantes transforman los nitratos en el nitrógeno responsable de la ascensión del fango.

- **Bulking sludge:** se trata de un aumento del volumen aparente de los flóculos que provoca una velocidad de sedimentación muy lenta, de forma que los flóculos pueden salir con el efluente depurado en el decantador debido a que no sedimenten o al aumento del manto de fangos en el decantador y al posterior ascenso del mismo. Suele deberse al crecimiento de microorganismos filamentosos. Se caracteriza por  $IVF > 200 \text{ mL/g}$ .

Es necesario indicar que los rangos de IVF dados para determinar el tipo de fenómeno que se está manifestando en el decantador secundario son orientativos y que pueden variar de unas plantas a otras.

Tanto el bulking como el foaming (floating sludge) son más difíciles de solucionar que el resto, ya que algunos tipos son debidos al crecimiento de una serie de microorganismos filamentosos (bacterias y hongos) cuyos factores de crecimiento y desarrollo no están hasta la fecha bien determinados.

### **I.3.1. Anomalías en la biomasa del reactor.**

En este apartado se pretenden explicar las causas y consecuencias de las espumas debidas a la presencia de microorganismos filamentosos. Dado que en las plantas depuradoras aparecen otro tipo de espumas, y para establecer las diferencias con el foaming filamentoso, se procede a describir brevemente los tipos de espumas.

#### **I.3.1.1. Espumas no filamentosas.**

- **Espumas por surfactantes biodegradables,** son típicas de puestas en marcha del proceso y suelen desaparecer cuando aparecen los primeros biosólidos ( $500-700 \text{ gMLSS/m}^3$ ). Se caracterizan porque tienen un color blanco y son poco densas y dispersables. Aparecen en el reactor y en el decantador debido a la presencia de detergentes no biodegradables y por el exceso de moléculas tensioactivas en el influente. Normalmente son fenómenos transitorios que desaparecen cuando el fango alcanza un cierto grado de madurez y estabilidad. En casos extremos pueden emplearse antiespumantes derivados de la silicona.

- **Espumas por surfactantes no biodegradables,** son similares a las anteriores, en este caso suelen desaparecer cuando el producto que produce la espuma se diluye.

- **Espumas de desnitrificación,** se producen en los clarificadores por la ascensión de flóculos con pequeñas burbujas de gas adheridas, producto del desprendimiento de nitrógeno que se produce por la reducción de nitritos y nitratos, presentes en los fangos activados, a cargo de bacterias facultativas en medio anóxico. Se puede distinguir de las de origen filamentosas, por una menor abundancia de filamentosas y por la presencia de microburbujas en los clarificadores.

### I.3.1.2. Espumas filamentosas

Se forman bajo ciertas condiciones en los tratamientos biológicos, están asociadas a la proliferación de ciertos microorganismos filamentosos aerobios como Nocardias, Microthrix Parvicella o Tipo 1863. Los filamentos de dichos microorganismos forman entramados superficiales donde quedan atrapados burbujas de aire y flóculos orgánicos, constituyendo un segundo cultivo biológico que coexiste con el licor mezcla de los fangos activados.

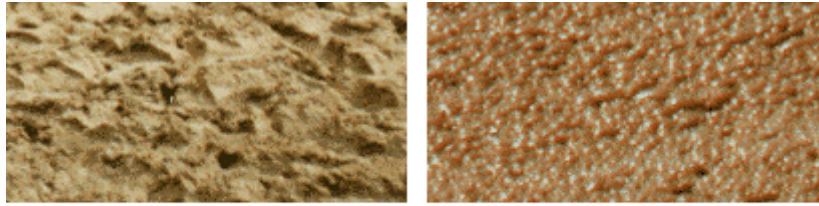
Si se observa a microscopio, se aprecian niveles elevados de microorganismos filamentosos; dichos microorganismos suelen aparecer libres en el licor mezcla, presentándose en forma de filamentos cortos miceliales, como cadenas irregulares de células o como filamentos largos enrollados.

Como se observa en las Figuras I.12 y I.13., estas espumas se caracterizan por tener una densidad considerable y un color pardusco.



Figura I.12. Espumas filamentosas en tratamientos biológicos.





**Figura I.13. Espumas debidas a Microthrix Parvicella.**

Las espumas producidas por microorganismos filamentosos suelen ser producidas por los siguientes fenómenos:

- Secreciones de material polimérico exocelular, por parte de bacterias, que pueden interferir en la interfase aire-agua (este mecanismo es poco conocido). Algunos autores opinan que este proceso puede estar asociado a la limitación de nutrientes, a oscilaciones de carga, etc. Las filamentosas asociadas a este fenómeno son posiblemente la Tipo 1863 y otras características del esponjamiento filamentososo.

- Comportamiento hidrófobo de bacterias filamentosas que provoca una estructura trifásica aire-agua-células (o flóculos). Este fenómeno se asocia a las bacterias nocardias (NALO) o gordonas (GALO) y M. Parvicella. Las nocardias o gordonas tienen elevadas cantidades de ácidos micólicos de cadena larga en sus paredes celulares. La proliferación de estas bacterias provoca un comportamiento hidrófobo de los flóculos.

Con la formación de estas espumas viscosas se observa un atrapamiento de sólidos (flóculos y células). El atrapamiento de sólidos hidrófobos y la emulsión de estos sólidos por los sistemas de aireación, provoca que en la zona superior del reactor se acumulen una gran cantidad de estos microorganismos.

A continuación se describen algunas condiciones que pueden favorecer el desarrollo de las espumas filamentosas:

- Los surfactantes potencian y hacen más estable la espuma.
- Las burbujas de aire de pequeño tamaño favorecen la formación de espumas.
- En situaciones de escasez de oxígeno en las balsas de aireación, las microburbujas de aire retenidas en las espumas favorecen el desarrollo de los microorganismos filamentosos, que compiten ventajosamente con los microorganismos del licor mezcla, formado principalmente por colonias de bacterias y protozoos ciliados.
- Los microorganismos del grupo actinomicetos (al que pertenecen los NALO), tienen como fuente de carbono sustratos fácilmente asimilables como azúcares y ácidos grasos de bajo peso molecular, compuestos de alto peso molecular como polisacáridos, proteínas, pesticidas y compuestos aromáticos.
- Por las características hidrófobas de la pared celular de estas filamentosas y por ocupar la zona superior del reactor, las NALO pueden acceder a los sustratos que flotan como grasas y aceites.

Las espumas filamentosas generan una serie de efectos perjudiciales sobre el normal funcionamiento de la planta, algunos de estos efectos se describen a continuación:

- Las espumas generadas en los tanques de aireación pueden llegar hasta el decantador secundario e incorporarse al efluente depurado con el consiguiente empeoramiento de la calidad del agua. En algunos casos la pérdida de calidad en el agua se debe a la turbiedad producida por filamentos cortos que fugan con el efluente.
- Reducción de la transferencia de oxígeno.
- Pueden generar problemas en los mecanismos de aireación superficial, los cuales sufren desgastes mecánicos por vibraciones y desequilibrios; esto provoca una reducción del rendimiento de oxigenación y un aumento en el consumo energético.
- Se crea un microhábitat incontrolado en la zona superficial del reactor caracterizado por mayores edades que las del licor mezcla; esto favorece el desarrollo de grandes cantidades de rotíferos y nemátodos, que a su vez inducen una serie de nitrificaciones parciales y posteriores desnitrificaciones que dificultan el control del proceso.
- Pueden producirse putrefacciones y malos olores debido a la falta de mezcla de las espumas.
- Generan problemas de suciedad debido a reboses fuera de las unidades de servicio.

A continuación se enumeran una serie de operaciones que se realizan en la práctica para el control del desarrollo de las espumas filamentosas:

- Eliminación de las zonas de atrapamiento; la salida del licor debe realizarse por la parte superior, por la superficie y sin retención de espumas. La campana del clarificador también tiene que tener salida de espumas.
- Minimizar el aporte de aire; las instalaciones de mayor riesgo son las de inyección de aire por burbuja fina. Puede dar resultado bajar el aporte de oxígeno y la consigna de oxígeno.
- No enviar los flotantes a la cabecera de la planta ni a la línea de fangos, eliminarlos mediante cal y prensado.
- Cloración: adición de hipoclorito en la recirculación, es necesario encontrar la dosis óptima.
- La retirada física de las espumas fuera de la superficie de las unidades de tratamiento biológico constituye, en general, la solución más eficaz, aunque difícil de llevar a la práctica si en el diseño no se han previsto dispositivos adecuados.
- Aspersión de agua tratada sobre las espumas del reactor y del decantador, de forma que se hundan y se mezclen.

- Empleo de selectores.
- Las espumas originadas por desnitrificación, pueden combatirse limitando el nivel de oxígeno disuelto en la aireación. Bajando la edad de fangos, y en general reduciendo la influencia de aquellos factores que favorecen la desnitrificación en los clarificadores.
- Uso de potenciadores biológicos como ácido fólico.

Algunas de estas soluciones al problema de las espumas, serán estudiadas con mayor detenimiento en el próximo capítulo de este documento.

Existen además, una serie de parámetros de diseño orientados a la prevención de la aparición de espumas:

- Evitar los saltos de agua en los rebosaderos previos a arquetas, donde la salida de agua se realiza por tubería sumergida; de esta forma se evita la formación y acumulación de espumas en dichas arquetas.
- Las conducciones de salida del agua tratada desde los decantadores secundarios hasta el cauce receptor han de ser de tal forma que no se produzcan saltos de agua, que impliquen una aireación brusca del agua, susceptible de provocar inoportunas formaciones de espumas.
- En las depuradoras de fangos activados, conviene incluir dispositivos adecuados para la retirada física de las espumas fuera del tratamiento biológico.
- Disposición de deflectores a la salida de las balsas de aireación, que impiden en la mayoría de los casos la proliferación de espumas y el paso masivo de éstas a los decantadores secundarios.
- En las balsas aireadas mediante turbinas, la agitación superficial impide que la retención de espumas en las balsas de aireación de lugar a la formación de costras.

### **I.3.2. Anomalías en la clarificación (Esponjamiento).**

El esponjamiento es un problema habitual en los procesos de fangos activos, como ya se ha señalado anteriormente, se caracteriza por una densidad de fangos pequeña que dificulta la sedimentación en el decantador secundario. Pueden identificarse dos tipos distintos de esponjamiento:

- El viscoso o zoogleal.
- El filamentoso.

#### **I.3.2.1. Esponjamiento viscoso.**

El esponjamiento viscoso o zoogleal (jelly bulking or non filamentous bulking), se debe a una síntesis excesiva de exopolímero bacteriano con carácter hidrofílico que forma una matriz gelatinosa constituida principalmente por hidratos de carbono y glicoproteínas.

Dicha matriz produce una estructura con una gran capacidad de retención de moléculas de agua. Como cualquier polímero orgánico, el glicocálix aumenta la viscosidad del agua.

La mayor viscosidad del agua unido a la capacidad de retención de agua de los biopolímeros exocelulares, provocan un descenso en las velocidades de sedimentación y compactación de los fangos biológicos.

Una de las causas de la aparición de este fenómeno es un déficit nutricional, sobre todo si se produce un exceso de materia carbonosa frente a los nutrientes N y P.

Una de las soluciones a este problema es realizar un “by-pass” a la decantación primaria e introducirlo en el reactor biológico para aumentar la cantidad de micronutrientes esenciales.

### **I.3.2.2. Esponjamiento filamentoso.**

El objetivo de este apartado es la descripción del bulking debido a la presencia de microorganismos filamentosos, así como el estudio de las causas del desarrollo de este fenómeno y los efectos que produce en la depuración biológica de las aguas residuales.

Bulking filamentoso es el término empleado para el fenómeno por el cual, la presencia elevada de microorganismos filamentosos en el licor mezcla produce una serie de perturbaciones en la estructura de los flóculos que dificultan la sedimentabilidad en el decantador. Como se observa en la Figuras I.14., los filamentos pueden dar lugar a dos tipos de estructuras:

- Flóculo difuso o estructura abierta, en la que no se observan los flóculos con nitidez. En este tipo de estructura las bacterias floculantes crecen sobre un entramado de bacterias filamentosas.
- Enlaces o puentes de flóculos, en la que aparecen flóculos bien formados con bacterias filamentosas que se introducen en ellos y establecen enlaces.

Ambas estructuras aumentan el índice volumétrico de fangos (I.V.F.) y dificultan, como ya se ha dicho, la sedimentabilidad.

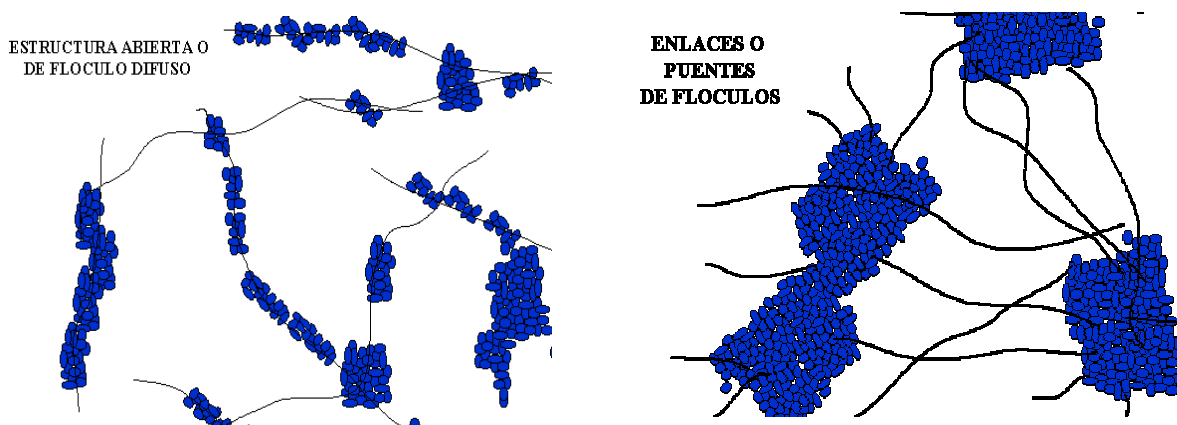


Figura I.14. Estructuras que dan lugar al fenómeno de bulking.

Al igual que en el caso de las espumas, la observación a través del microscopio mostrará elevadas cantidades de bacterias filamentosas así como las estructuras esquematizadas en la Figura I.14.

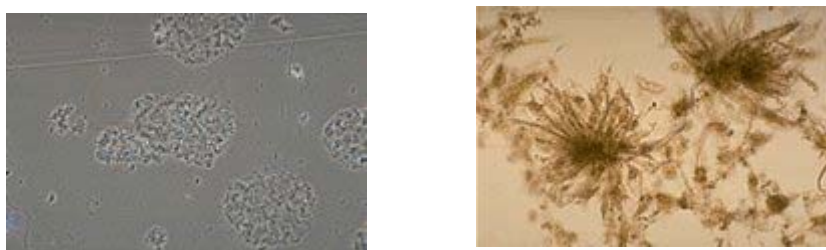


Figura I.15. Visión microscópica de flocos sin microorganismos filamentosos.

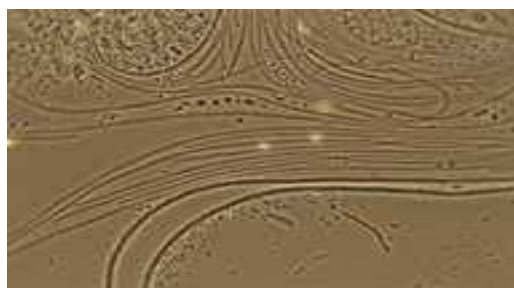


Figura I.16. Visión microscópica de un fango activo con elevadas cantidades de microorganismos filamentosos.

El bulking por microorganismos filamentosos puede clasificarse según las causas que lo producen:

- **Bulking por oxígeno disuelto bajo:** asociado a las bacterias filamentosas *Sphaerotilus natans*, Tipo 1701 y *Haliscomenobacter hydrossis*.
- **Bulking por condiciones sépticas/ alto contenido en sulfuros:** asociado a las bacterias filamentosas *Thiothrix sp*, *Beggiatoa* y Tipo 021N.

- **Bulking por baja carga másica (F/M):** asociado a las bacterias filamentosas *Microthrix parvicella*, *Haliscomenobacter hydrossis*, *Nocardia* sp, Tipos 021N,0041,0675,0092,0961.
- **Bulking por deficiencia de nutrientes:** asociado a las bacterias filamentosas *Thiothrix* sp, *Sphaerotilus natans*, Tipo 021N y posiblemente por *Haliscomenobacter hydrossis* y Tipos 0041,0675.
- **Bulking por pH bajo (< 6.5):** producido por hongos.

En la actualidad, muchos equipos de investigación están trabajando en la determinación de las causas que producen el esponjamiento. El tipo de bacteria filamentosas que predomina en un caso de bulking, puede darnos una idea de que causas lo producen; de ahí la necesidad de estudiar y conocer el metabolismo de estos organismos. Algunas de las causas que se han encontrado a la proliferación de estas bacterias son:

- Condiciones sépticas y/o contenido en sulfuros, que favorecen el crecimiento de algunas filamentosas capaces de metabolizar los algunos compuestos de azufre.
- Desequilibrio de nutrientes.
- Abundancia de compuestos orgánicos de bajo peso molecular (en muchos casos compuestos fácilmente asimilables).
- Presencia de sustratos complejos.
- Influyente con pH bajo, que favorece el desarrollo de algunos tipos de hongos.
- Desequilibrios entre la fracción particulada y la soluble.
- Oscilaciones notables de la carga al reactor.
- Entrada de bacterias filamentosas en los colectores, reintroducción de filamentosas por recirculación o sobrenadantes.
- Aporte inadecuado del oxígeno a la carga entrante o deficiencia de oxígeno disuelto, la mayor superficie específica de las filamentosas respecto a las formadoras de flóculos hace a las primeras más competitivas cuando el oxígeno disuelto escasea.
- Deficiencias en el mezclado del reactor, que dificulta la difusión del sustrato en el interior de los flóculos.
- Temperatura del agua, se ha comprobado que en invierno, al bajar la temperatura del agua, el crecimiento de las bacterias filamentosas es menor y por tanto el problema de bulking disminuye en su intensidad.
- Baja carga másica (F/M), los factores por los que este parámetro favorece el crecimiento de las filamentosas respecto a las no filamentosas, no son del todo conocidos. Sobre este

fenómeno existen numerosas hipótesis, algunas de ellas contradictorias, que no están totalmente confirmadas.

- Configuración del reactor y tipo de flujo.

La baja sedimentabilidad de los fangos afectados por el bulking provoca una fuga de flóculos en el efluente del decantador, esta fuga produce unos contenidos orgánicos en el agua que pueden ser inadmisibles; de ahí la necesidad de eliminar o controlar dicho fenómeno.

Dado que en todos los sistemas de fangos activados aparecen bacterias filamentosas, el desarrollo del bulking suele ser un problema habitual en este tipo de plantas. Lo ideal sería disponer de medidas preventivas, tanto en el ámbito de diseño como de operación, que permitieran un control de este fenómeno. Sin embargo, en la actualidad no existen criterios de diseño y especificaciones de operación que permitan asegurar la erradicación del problema en caso de su aparición. Esto no quiere decir que no existan ciertos factores de diseño, que permitan una cierta acción preventiva o que posibiliten la aplicación de acciones correctoras.

Jenkins <sup>(4)</sup> ha descrito una aproximación general de las estrategias de control a utilizar para controlar el fenómeno de bulking, dicha estrategia de control se basa en la ejecución de las siguientes etapas:

- **Identificación del problema:** se basa en la identificación de los microorganismos causantes del bulking a través de un examen microscópico del fango activado. Una vez identificados, se procede a la identificación de la probable causa de bulking y a la aplicación de medidas correctoras concretas.

- **Aplicación de medidas correctoras:** una vez identificadas las causas se procede a la aplicación de medidas concretas, éstas se dividen en medidas no específicas y específicas:

**Métodos no específicos:** se realizan cuando el estudio del problema nos lleva a soluciones que pueden suponer cambios estructurales importantes y costosos (por ejemplo modificaciones en la configuración del tanque de aireación, aumento en la capacidad de aireación, control de vertidos industriales, etc.), cuya puesta en marcha puede ser lenta. Los métodos no específicos se caracterizan por su rapidez de aplicación, pueden emplearse como métodos de acción inmediata ante apariciones puntuales de bulking, o como primera fase de actuación mientras se ponen en marcha los métodos específicos.

Los métodos no específicos empleados son:

# Modificación del caudal de recirculación y de los puntos de entrada del caudal en el tanque de aireación: basado en la optimización de la decantación secundaria, sólo es posible su aplicación en los casos en que la planta tenga la suficiente flexibilidad de operación.

# Adición de productos químicos al licor mezcla: suelen ser productos que favorecen la agregación de los flóculos sin destruir los organismos causantes del bulking. Se dividen en

coagulantes y floculantes. En ambos casos la dosificación debe ser continua mientras dure el esponjamiento, suelen dosificarse en el paso del reactor al decantador. Este método necesita de estudios previos en laboratorio, ya que no todos los fangos responden igual a estos productos.

A pesar de ser una medida de rápido efecto, no pasa de ser una medida puntual y de emergencia mientras se obtiene otra solución de carácter definitivo.

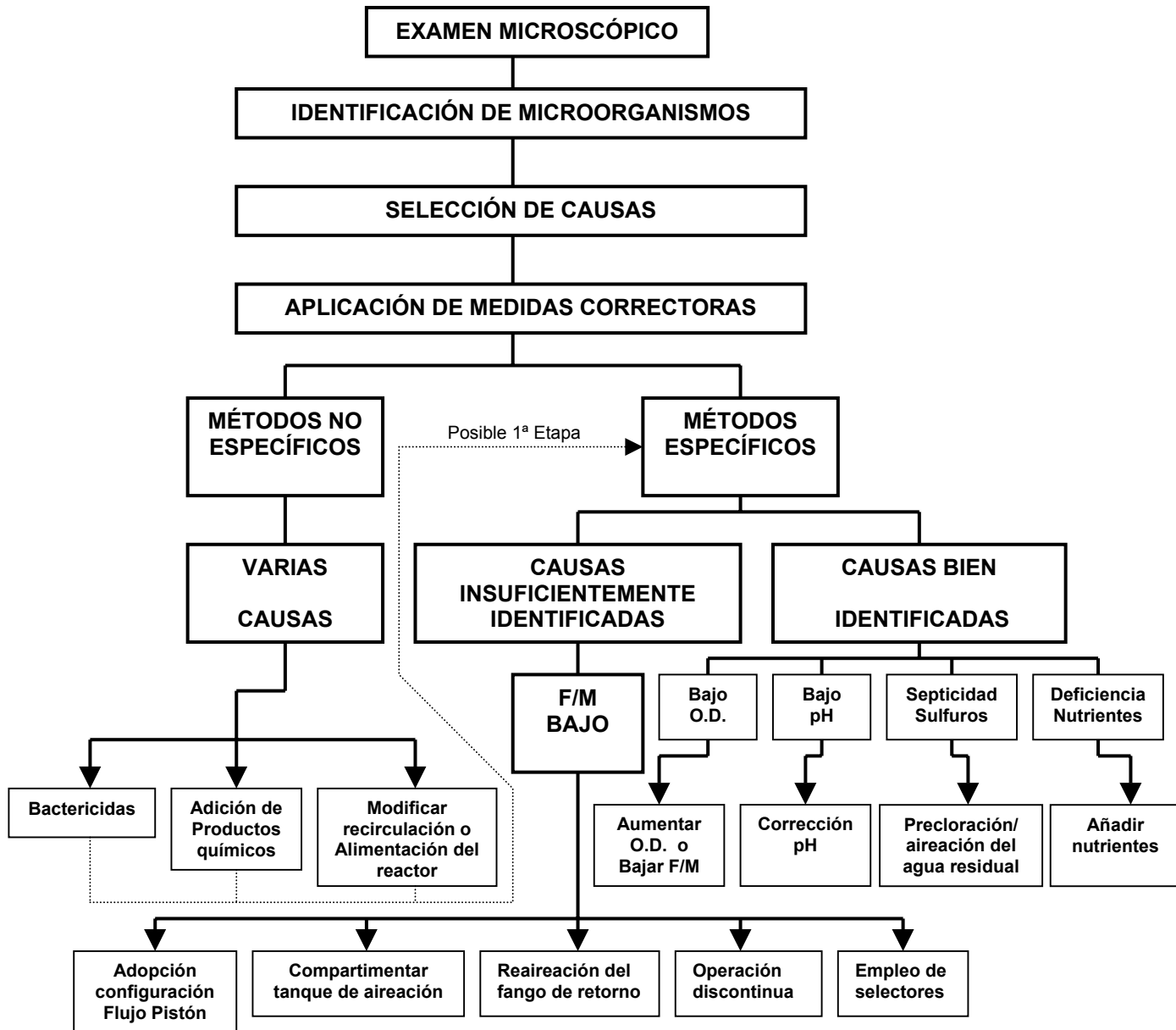


Figura I.17. Estrategia de Control de Jenkins.

# Adición de productos bactericidas para la destrucción selectiva de los microorganismos causantes de bulking: estos productos pueden destruir tanto bacterias filamentosas como formadoras de flóculos, pero debido a la mayor superficie específica de las filamentosas,



su efecto es mayor que en las formadoras de flóculos. El bactericida más empleado es el hipoclorito, cuyo uso se remonta a 1936 y sobre el que se dispone de gran experiencia e información. Además, se emplean otros bactericidas como el peróxido de hidrógeno, el cloruro férrico y algunos polielectrolitos que suelen elevar el coste de operación de la planta.

Es importante encontrar la dosis adecuada en cada caso y suele iniciarse el tratamiento con una dosis de choque y a continuación se va reduciendo la dosis hasta encontrar la adecuada.

**Métodos específicos:** son medidas dirigidas a la corrección de causas concretas, de ellas todas salvo la atribuible a valores bajos de F/M permiten su identificación y la aplicación objetiva de medidas correctoras.

# Baja concentración de oxígeno disuelto en el tanque de aireación: la confirmación de que es esta la causa del desarrollo de bulking en un caso concreto, permite actuar por dos vías distintas; por una parte se puede incrementar el nivel de oxígeno disuelto mediante un incremento del O<sub>2</sub> aportado o mediante la inyección de oxígeno puro; la otra vía es reducir la carga másica (F/M), ya que se ha comprobado que el parámetro crítico es en realidad la tasa de respiración (OUR) y no la concentración de O.D. en el tanque. La primera vía suele provocar un aumento del coste de inversión o del consumo energético, si se dispone de un equipamiento suficiente; además, puede iniciarse un proceso de nitrificación. La segunda vía puede producir un incremento de los sólidos en suspensión del licor mezcla (SSLM), que puede llegar a superar la carga admisible del decantador, además, también puede iniciarse la nitrificación.

# Agua residual séptica: la medida adecuada es la modificación de las condiciones del agua residual, mediante una cloración previa al reactor biológico.

# Deficiencia de nutrientes: debe cuantificarse la carencia de nutrientes, y añadir las cantidades de nutrientes necesarias.

# Valores bajos de pH: debe medirse adecuadamente el pH y mantenerlo en el rango de operación adecuado.

# Alto contenido en sulfuros: la medida correctora es una oxidación de los sulfuros previa al reactor, dicha oxidación se realiza mediante una preaireación del agua residual.

# Baja carga másica (F/M): una de las medidas asociadas a esta causa es la introducción de *selectores*; éstos, se basan en el empleo de ciertos tanques o compartimentos en el que se emplean unos parámetros de operación que favorecen el crecimiento de las bacterias formadoras de flóculos respecto de las filamentosas. Otro modo de actuar es mediante la modificación de la configuración del reactor. Se ha comprobado que la configuración en flujo de pistón no presenta, en general, problemas de bulking asociados a un F/M bajo <sup>(6)</sup>, esto es debido a la existencia de una zona donde hay un alto contenido de sustrato que produce un efecto de selección de microorganismos, cosa que no ocurre en los reactores de mezcla perfecta. En el caso de reactores discontinuos, este tipo de selección se produce en las primeras etapas de operación, ya que al principio la concentración de sustrato en el licor mezcla es elevada.

Como última medida propuesta está la reaireación del fango activado en la recirculación, basada en conseguir el agotamiento de la capacidad de acumulación de sustrato de los microorganismos formadores de flóculos, para conseguir así una mayor tasa de crecimiento frente a los filamentosos. Esta medida trae consigo un aumento de la masa de fangos.

Estas son las propuestas de acción señaladas en la estrategia de control de Jenkins, algunas de estas medidas correctoras junto a otras que se incorporarán, serán ampliadas en el capítulo siguiente de este documento.

### **I.3.3. Identificación de las bacterias filamentosas.**

Como se ha expuesto en el apartado anterior, el entendimiento del bulking y las medidas que hay que realizar para controlar su desarrollo, dependen en gran medida de las bacterias filamentosas presentes en cada caso particular. En este apartado, se estudiará como se realiza la identificación de dichos microorganismos.

La identificación de microorganismos filamentosos debe realizarse preferentemente a 1000 aumentos en contraste de fases. Para poder identificar los tipos de microorganismos, se buscarán una serie de características morfológicas apoyándonos, cuando sea necesario, de la realización de tinciones y test.

Mediante el uso de un microscopio debe observarse:

- La existencia o no de ramificaciones.
- La movilidad o no de las bacterias filamentosas.
- La forma del filamento: recto, ligeramente curvado, torcido, cadena irregular de células, irregularmente enrollados, miceliar.
- Color del filamento: transparente, medio, oscuro.
- Situación del filamento: en el interior del flóculo, saliendo hacia el licor exterior, libre en el licor.
- Existencia de crecimiento adherido (bacterias epíficas).
- Presencia de vainas.
- Presencia y aspecto de los septos que separan las células entre sí.
- Existencia o no de indentaciones.
- Dimensiones del filamento.
- Forma de las células: cuadradas, rectangulares, ovales, tonel, discoide, extremos redondeados, esféricas, no observables.
- Dimensiones de las células.

- Gránulos de azufre: in situ y tras el test de azufre.
- Presencia de rosetas, gonidios, etc.

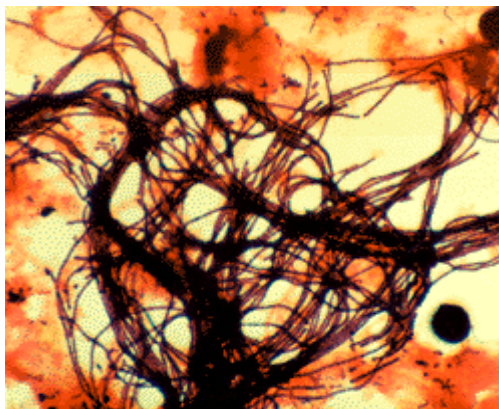
Las tinciones empleadas en la identificación de microorganismos son:

- Tinción de Gram: positiva, negativa, variable.
- Tinción de Neisser: para el filamento positiva o negativa, y en ese caso puede haber gránulos positivos.
- Tinción de PHB.
- Tinción de vainas.

Los métodos convencionales de identificación de microorganismos, suponen un aislamiento previo en medios de cultivo, y posteriores pruebas fenotípicas, quimiotaxonómicas y genéticas. Sin embargo, la mayor parte de las bacterias filamentosas causantes de los fenómenos de bulking y foaming, no han podido ser aisladas hasta la fecha, lo cual implica la inexistencia de una descripción taxonómica adecuada para definir las.

Tras la observación de una gran cantidad de muestras de fangos activados, Eikelboom desarrollo en 1975 una nomenclatura basada en la observación microscópica de unas características morfológicas<sup>(5)</sup>. Esta nomenclatura ha sido revisada y actualizada por Jenkins, Richard y Daigger<sup>(4)</sup>, el manual elaborado por estos autores es en la actualidad un punto de referencia obligado, e incluye criterios de evaluación de los flóculos y de la abundancia de bacterias filamentosas, así como métodos de tinción y test complementarios de identificación.

A efectos prácticos, la observación microscópica es suficiente para identificar los microorganismos filamentosos, aunque se están desarrollando métodos de identificación molecular, caracterizados por ser más específicos y objetivos.



**Figura I.18. Microthrix Parvicella, tinción Gram × 1000.**

Por último, se muestra un cuadro empleado en la identificación de microorganismos filamentosos:

Tipo de filamentososa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
<b>S. Natans</b> <sub>1</sub>	-	-	-	-	-	PHB	1.0-1.4	>500	R	E	+	-	+	Bc
<b>Tipo 1701</b>	-	-	-	-	-	PHB	0.6-0.8	20-80	R,D	I,E	+	++	+	Bc
<b>Tipo 0041</b>	+,v	-	-,+	-	-	-	1.4-1.6	100-500	R	I,E	+	++,-	+	C
<b>Tipo 0675</b>	+,v	-	-,+	-	-	-	0.8-1.0	50-150	R	I	+	++,-	+	C
<b>Tipo 021N</b> <sub>2</sub>	-	-	-,+	-,+	+	PHB	1.0-2.0	50-500	R,Lc	E	+	-	-	R
<b>Thiothrix I</b> <sub>2</sub>	-,+	-	-,+	+, -	+	PHB	1.4-2.5	100-500	R,Lc	E	+	-	+	R
<b>Thiothrix II</b> <sub>2</sub>	-	-	-,+	+, -	+	PHB	0.8-2.4	50-200	R,Lc	E	+	-	+	R
<b>Tipo 0914</b> <sub>3</sub>	-,+	-	-,+	-,+	-	PHB	1.0	50-200	R	E,L	+	-	-	R
<b>Beggiatoa</b> <sub>4</sub>	-,+	-	-,+	+, -	+	PHB	1.2-3.0	100-500	R	L	-+	-	-	R
<b>Tipo 1851</b>	+	?	-	-	-	-	0.8	100-300	R,D	E	+,-	-,+	+	R
<b>Tipo 0803</b>	-	-	-	-	-	-	0.8	50-150	R	E,L	+	-	-	
<b>Tipo 0092</b>	-	+	-	-	-	+	0.8-1.0	20-60	R,D	I	+,-	-	-	R
<b>Tipo 0961</b> <sub>6</sub>	-	-	-	-	-	-	0.8-1.2	40-80	R	E	+	-	-	R
<b>M. parvicella</b>	+	-	+	-	-	PHB	0.8	100-400	C	I	-	-	-	
<b>Nocardia</b> <sub>7</sub>	+	-	+	-	-	PHB	1.0	10-20	I	I	+,-	-	-	I
<b>N. limicola I</b>	+	+	-	-	-	-	0.8	100	C	I,E	-	-	-	D
<b>N. limicola II</b>	-,+	+, -	-	-	-	PHB	1.2-1.4	100-200	C	I,E	+	-	-	D
<b>N. limicola III</b>	+	+	-	-	-	PHB	2.0	200-300	C	I,E	+	-	-	D
<b>H. hidrossys</b> <sub>5</sub>	-	-	-	-	-	-	0.5	20-100	R,D	E,L	-	-,+	+	
<b>Tipo 0581</b>	-	-	-	-	-	-	0.5-0.8	100-200	C	I	-	-	-	
<b>Tipo 1863</b> <sub>8</sub>	-	-	-,+	-	-	-	0.8	20-50	D,I	E,L	+	-	-	O
<b>Tipo 0411</b>	-	-	-	-	-	-	0.8	50-150	D,I	E	+	-	-	

#### Leyenda:

**1:** Tinción Gram, **2:** Tinción Neisser (tricoma), **3:** Tinción Neisser (gránulos), **4:** Azufre in situ, **5:** Azufre tras test, **6:** Otras inclusiones, **7:** Diámetro del tricoma ( $\mu\text{m}$ ), **8:** Longitud del tricoma ( $\mu\text{m}$ ), **9:** Forma del tricoma, **10:** Localización del tricoma, **11:** Septo visible, **12:** Bacterias adheridas, **13:** Vaina, **14:** Morfología de las células

+: positivo; -: negativo; v: variable; +, - o -,+: variable siendo el primero el más frecuente.

#### Forma del tricoma:

R: recto; D: doblado; C: curvado; Lc: ligeramente curvado; I: irregular.

#### Localización del tricoma:

E: Se extiende desde la superficie del flóculo.

I: Mayoritariamente en el interior del flóculo.

L: Libre en el líquido entre los flóculos.

#### Morfología celular:

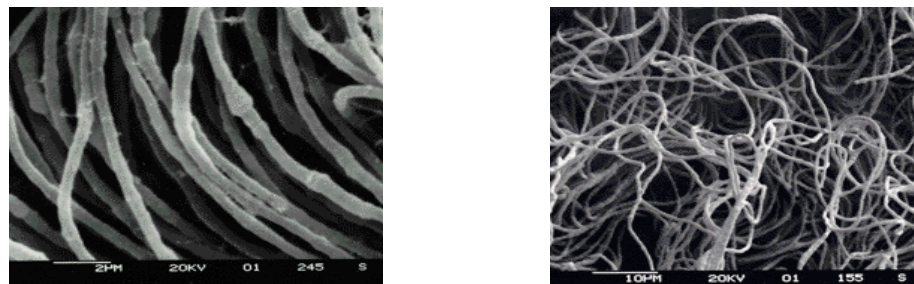
Bc: bacilar; C: cuadrada; R: rectangular; D: discoidal; o: oval

#### Notas:

**1:** Falsas ramificaciones; **2:** Rosetas y gonidios; **3:** Gránulos de azufre cuadrados; **4:** Móvil;

**5:** Aspecto de agujas; **6:** Transparente; **7:** Ramificaciones verdaderas; **8:** Cadenas de células.

**Tabla I.1. Clave de identificación de los microorganismos filamentosos ( Jenkins, Richard y Daigger, 1993).**



**Figura I.19. Visión microscópica de *Microthrix Parvicella*.**



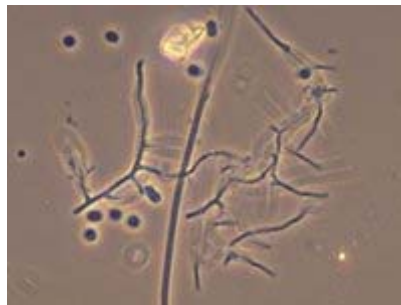
**Figura I.20. Tinción Gram x 1000 y visión microscópica de *Nostocoida Limicola I***



**Figura I.21. *Nostocoida Limicola II*.**



**Figura I.22. Nostocoida Limicola III.**



**Figura I.23. Nocardia.**



**Figura I.24. Tipo 1863.**