

Resumen

La tecnología de lecho móvil es una tecnología novedosa que se caracteriza por ser un tratamiento biológico de fangos activados donde la biomasa crece adherida a un soporte inerte (plástico) que se mueve dentro del reactor. Como principales ventajas frente a tratamientos biológicos convencionales se destacan la reducción de volumen del reactor, la simplicidad de operación y la facilidad de adaptación en instalaciones antiguas.

Se presentan tanto los resultados obtenidos en plantas de distintos sectores industriales, como las últimas líneas de investigación seguidas orientadas a la eliminación combinada de materia orgánica y nitrógeno.

Palabras clave:

Biopelícula, lecho móvil, biomasa, fangos activos, bulking, biodegradación materia orgánica, nitrificación.

Abstract**Advantages and applications of moving bed technology in urban and industrial waste waters**

Moving bed technology is a new biological treatment by activated sludge where the biomass grows attached to a inert media (plastic) that moves free along the reactor. The main advantages of this technology are the reduction of the reactor volume, simplicity of operation and the easiest way for the upgrading of plants. Results of different industrial applications are shown together with the latest researches lines that combine organic matter and nitrogen removal.

Keywords:

Biofilm, moving bed, biomass, activated sludge, bulking, biodegradation organic matter, nitrification.

Ventajas y aplicaciones de la tecnología de lecho móvil en aguas residuales urbanas e industriales

Por: **Asun Larrea Urcola**, departamento de I+D de ATM (*), **Gorka Zalakain Bengoa**, departamento de I+D de ATM (*), **Luis Larrea Urcola**, de CEIT y Tecnun (Universidad de Navarra) (*) y **Arantza Abad Alba**, del CEIT (**)

(*) **Asistencia Tecnológica Medioambiental S.A. (ATM)**

Epele Bailara 29
20120 Hernani (Guipúzcoa)
Tel.: 943 331 838 - Fax: 943 331 521
E-mail: alarrea@atmsa.com - gzalakain@atmsa.com
Web : www.atmsa.com

(**) **CEIT y Tecnun (Universidad de Navarra)**

Paseo de Manuel Lardizabal 15
20018 San Sebastián (Guipúzcoa)
Tel.: 943 212 800
E-mail: llarrea@ceit.es
Web: www.ceit.es

1. Introducción

La evolución de los tratamientos biológicos de aguas residuales está marcado por una serie de condicionantes tanto técnicos como económicos que definen cuál es el tipo de proceso más adecuado para cada problema de tratamiento de aguas residuales.

En la actualidad, tanto en el sector urbano como industrial los tratamientos deben de ocupar poco espacio, ser fáciles de operar y ser los más económicos posibles, tanto en su inversión como en su explotación.

Atendiendo a todos estos condicionantes, se ha desarrollado la tecnología de lecho móvil que presenta una serie de ventajas frente a otros tratamientos biológicos más convencionales, entre los que destacan la reducción de volumen (espacio) y la sencillez de operación (desaparece el bulking filamentoso, la recirculación de fangos).

En los siguientes apartados se describe el proceso de lecho móvil y

se presentan una serie de aplicaciones tanto a escala piloto como real para aguas urbanas e industriales.

2. Descripción del proceso de lecho móvil

El principio básico del proceso de lecho móvil es el crecimiento de la biomasa en soportes plásticos que se mueven en el reactor biológico mediante la agitación generada por sistemas de aireación (reactores aerobios) o por sistemas mecánicos (en reactores anóxicos o anaerobios). Los soportes son de material plástico con densidad próxima a 1 gr/cm³ que les permite moverse fácilmente en el reactor incluso con porcentajes de llenado del 70%.

Estos procesos se caracterizan por la agrupación de bacterias en forma de biopelícula en el soporte contenido en el bioreactor; es por tanto importante, un soporte de elevada superficie específica y de este modo conseguir reducir el volumen del reactor biológico. En las capas superficiales de la biopelícula tie-

nen lugar las reacciones biológicas, tanto de eliminación de materia orgánica como de nitrificación desnitrificación.

El crecimiento de la biopelícula hace que zonas de las capas internas en condiciones anaerobias pierdan adherencia con el relleno y se desprendan, manteniendo de esta forma una regulación automática de la biomasa en función de la carga contaminante; estos sólidos desprendidos del soporte vienen a ser el exceso de fangos que hay que extraer del sistema (purga de fangos) y, por tanto, no requiere una recirculación de los mismos al reactor.

La operación de la planta queda muy simplificada ya que la extracción del reactor de los fangos en exceso es automática y no se requiere de una recirculación de biomasa al reactor.

En el proceso de separación de la biomasa procedente del reactor biológico se emplean decantadores que se diseñan como decantadores primarios en cuanto a velocidades ascensionales. Por otra parte y aunque inicialmente comenzaron a emplearse en aguas residuales industriales, actualmente se emplean sistemas de flotación también para la separación en el tratamiento de aguas urbanas.

Los requerimientos de oxígeno, nutrientes (para el caso de vertidos industriales) y producción de fangos son similares a otros procesos biológicos de biomasa en suspensión, con lo que los costes de explotación de un proceso de lecho móvil vienen a ser similares a los convencionales de fangos activos. El ahorro en la reducción de volumen tanto del reactor como del sistema de separación de sólidos, y en el sistema de aireación, se compensan con el gasto en el soporte plástico haciendo que los costes de inversión sean también similares. Los costes de personal se ven reducidos debido a que el funcionamiento de la instalación es automático.

Este tipo de procesos puede aplicarse tanto a plantas de tratamiento

para la biodegradación de materia orgánica como para instalaciones con eliminación de nutrientes, en aguas residuales urbanas e industriales. Otra aplicación es el empleo de esta tecnología en el rediseño de procesos actuales de fangos activos de forma sencilla y sin la necesidad de construir nuevos reactores biológicos.

2.1. Ventajas frente a procesos biológicos convencionales

Las principales ventajas que presenta el proceso de lecho móvil frente a los procesos biológicos convencionales son:

- Reducción de volumen de la instalación global. La reducción en el tamaño del reactor biológico se debe al empleo de un soporte que proporciona una superficie específica elevada para el crecimiento de la biomasa. La reducción en el tamaño del sistema de separación de sólidos se debe a una menor concentración de sólidos en suspensión en el reactor.
- Son procesos con gran flexibilidad ya que en función del porcentaje de soporte plástico empleado en el reactor, se recomienda no superior al 70%, se consigue modificar la superficie y en consecuencia la eficiencia del proceso.
- Ausencia de recirculación de fangos al reactor biológico. Esto da lugar a que la biomasa no dependa de la separación final del fango y en consecuencia se eviten problemas habituales encontrados en procesos convencionales de fangos activos relacionados con la sedimentabilidad del fango (bulking filamentoso, etc.).
- La operación y control de este tipo de procesos son sencillos. Por una parte, el proceso evita los problemas de atascamiento y periodos de limpieza típicos de otro tipo de procesos biofilm y además, no es necesario un control de la purga de fangos ya que el sistema mantiene la biomasa en

el reactor hasta que es desprendida del soporte.

- La ausencia de recirculación lleva a la generación de una biomasa característica de cada tipo de reactor (aerobio, anóxico o anaerobio) dando lugar a la obtención de un biofilm con una elevada actividad. Experimentalmente se ha constatado que las tasas de nitrificación y desnitrificación en este tipo de procesos son superiores a las obtenidas en los procesos convencionales.
- Permite la operación del proceso a cargas muy elevadas.
- Debido a que la mayor parte de la biomasa crece en la parte interior del soporte plástico, el proceso es menos sensible a variaciones de carga.
- Se trata de un sistema de fácil implantación especialmente en el rediseño de instalaciones ya existentes.
- Reducción de los costes de personal para mantenimiento de la instalación, debido a la sencillez de operación de la planta. Los costes de inversión resultan similares a los de plantas de fangos activos; la reducción de volumen del reactor y decantador secundarios junto con el ahorro de los difusores de burbuja fina resulta similar al coste del relleno plástico necesario.

2.2. Descripción del soporte plástico

Tal y como se ha mencionado en la descripción inicial, el principal aspecto de los procesos de lecho móvil es el crecimiento de la biomasa sobre las paredes de un soporte plástico siendo por tanto de gran importancia la geometría y superficie específica del mismo.

Existen diversos tipos de soportes plásticos en el mercado que presentan distintas características.

El soporte plástico (**Figuras 1 y 2**) seleccionado es el soporte AMB Biomedica, cuyas características quedan recogidas en la **Tabla 1**.

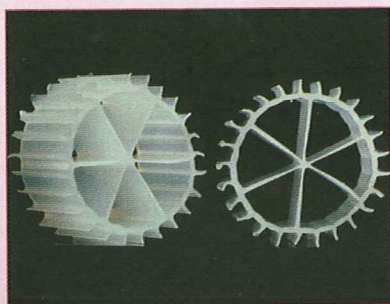


Figura 1. Geometría del relleno AMB Biomedica.

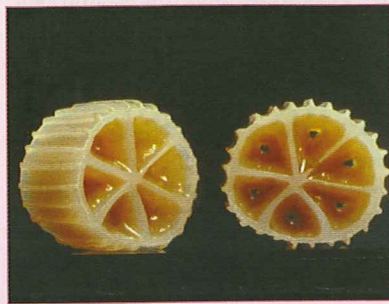


Figura 2. Biopelícula en el relleno AMB Biomedica.

Tabla 1

Material	Polietileno de alta densidad
Superficie específica total	850 m ² /m ³
Superficie específica efectiva	400 m ² /m ³
Diámetro	1,1 cm
Longitud	0,9 cm
Nº de aletas	25
Altura de las aletas	0,15 cm
Nº de cruces	3

Tabla 1. Características físicas del relleno AMB Biomedica.

2.3. Aplicaciones

Teniendo en cuenta las características que diferencia al proceso de lecho móvil frente a otros procesos puede decirse que las principales aplicaciones son:

- En el tratamiento de aguas residuales urbanas:
 - Incrementar la capacidad de antiguas estaciones depuradoras de fangos activos. La sustitución de la tecnología de fangos activos por la tecnología de lecho móvil en la misma balsa, permite que la planta pueda alcanzar nuevamente los requerimientos de salida.
 - Remodelación de estaciones depuradoras que deben cumplir nuevos requerimientos. Plantas que fueron diseñadas inicialmente para eliminación de ma-

teria orgánica pueden ampliarse de forma sencilla, sin necesidad de grandes cambios, en plantas para eliminación de materia orgánica y nitrógeno con la transformación de antiguas balsas en reactores con la tecnología de lecho móvil.

- Tratamiento de aguas residuales de núcleos aislados de población. El proceso de lecho móvil cumple uno de los principales requisitos de este tipo de tratamientos: operación sencilla y funcionamiento autónomo.
- En el tratamiento de aguas residuales industriales:
 - Aguas residuales con concentraciones de materia orgánica disuelta elevada.

3. Eliminación de materia orgánica

La configuración genérica para la eliminación de materia orgánica según la tecnología de lecho móvil es la que aparece en la Figura 3.

Las principales diferencias respecto a un proceso convencional de

fangos activos son la ausencia de recirculación de fangos y las dimensiones del reactor biológico y del decantador. Tal y como se ha explicado en las ventajas de la tecnología, tanto el reactor como el decantador son más pequeños, el primero por la capacidad del sistema de mantener una cantidad importante de biomasa activa y el segundo por el menor flujo de sólidos que llega al decantador.

El parámetro que se emplea en el diseño de procesos de lecho móvil, es el de la carga superficial o volumétrica expresada como grDQO /m².d o kgDQO/m³.d. El hecho de emplear parámetros de este tipo en el diseño obliga a una estimación empírica de los mismos (proyectos de investigación), ya que uno de los factores más importantes, además de los asociados al relleno e hidráulica, es la biodegradabilidad de las aguas a tratar. Para aguas urbanas el parámetro presenta menos desviaciones pero para el caso de aguas industriales se encuentran más diferencias. Además en este último caso es frecuente encontrar la necesidad de tratar únicamente un porcentaje de la materia orgánica (por vertido a colector, etc.), para lo que se diseñan sistemas de alta carga.

La Tabla 2 recoge valores orientativos de cargas volumétricas para aguas urbanas, industriales y para procesos de alta carga.

3.1. Aguas residuales urbanas

Dentro del sector de aguas urbanas, NILSA (Navarra de Infraestructuras Locales, sociedad pública

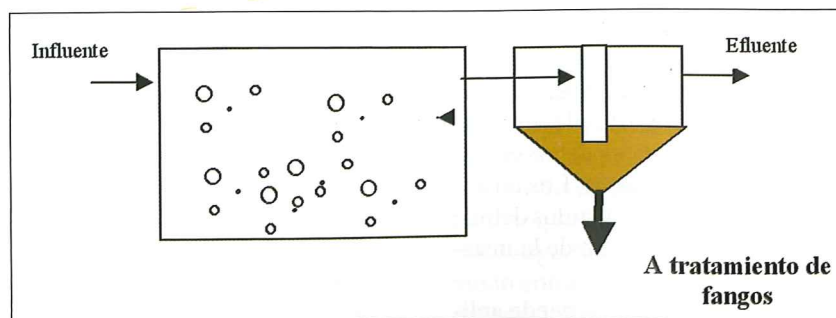


Figura 3. Esquema de proceso de lecho móvil.

adscrita al Departamento de Administración Local del Gobierno de Navarra) cuenta con varias plantas de tratamiento basadas en la tecnología de lecho móvil tanto como primera etapa de alta carga como para aplicación en la eliminación de nitrógeno, empleando el soporte plástico AMB Biomedica.

La incorporación de estos reactores en las plantas, bien como tratamiento primario de alta carga o como tratamiento secundario para eliminación de nitrógeno ha supuesto principalmente las siguientes ventajas:

- Ampliación de la capacidad de la planta sin necesidad de obra civil.
- Facilidad de operación y reducción de la analítica diaria de seguimiento.
- Robustez del sistema ante entrada de inhibidores en la planta

A modo de ejemplo se incluyen dos plantas urbanas que disponen de lecho móvil (Tabla 3).

3.2. Aguas residuales industriales

En cuanto al tratamiento de aguas residuales industriales, se presentan datos de plantas de tratamiento construidas en los últimos años en los siguientes tipos de efluentes: bodega, conservera, refrescos, matadero y papelera (Tabla 4).

Las dos primeras plantas de tratamiento constan básicamente de los siguientes elementos: pozo de bombeo, tamizado, balsa de homogeneización, reactor biológico de lecho móvil y un sistema de separación de sólidos en suspensión. En el caso de la empresa de refrescos (Figura 4), debido a la elevada biodegradabilidad de las aguas se ha empleado oxígeno puro en el reactor de lecho móvil y un flotador para la separación de sólidos posterior. En la instalación del matadero se ha modificado el anterior sistema biológico y se ha transformado a la tecnología de lecho móvil. En el último caso, para la industria papelera (Figura 5), el tratamiento consta de un proceso de lecho móvil y a continua-

Parámetro	Urbana	Industrial	Alta carga
Carga volumétrica de DQO aplicada (kgDQO/m ³ .d)	4-6	4-9	10-17

Tabla 2. Cargas volumétricas de diseño.

Parámetros de diseño	Unidad	Lekunberri (Navarra)	Isaba (Navarra)
Caudal de entrada	m ³ /d	2.500-5.000	250
Carga volumétrica aplicada	kgDQO/m ³ .d	3,7-17	3,3
DQO total de entrada	mg/l	300-700	400
Volumen de reactores			
ETAPA A	m ³		
200			
30			
% de relleno en el reactor	%	50	50
Tratamiento posterior		Filtros percoladores	Biodiscos
Sistema de separación de sólidos		Decantador	Decantador

Tabla 3. Características de diseño en dos plantas urbanas con lecho móvil.

Parámetros de diseño	Bodega	Conservera	Refrescos	Matadero	Papelera
Caudal de entrada m ³ /d	20	500	1.800	1.000	1.200
Carga volumétrica kgDQO/m ³ .d aplicada	9	6,5	9,9	7	7,5
DQO total de entrada mg/l	5.000-20.000	750-1.200	4000	3.100	400-1.250
Volumen de reactor m ³	45	90	730	435	200
% de relleno en el reactor %	50	50	40	50	50
Reactor	1	2 en serie	1	1 circular	1
Sistema de separación	Decantador	Decantador lamelar	Flotador	Decantador	Flotador

Tabla 4. Características de diseño más importantes de los cuatro casos.

ción un proceso convencional de fangos activos.

Tal y como se muestra en la Tabla 4, la principal característica de muchos procesos industriales es la variabilidad en cuanto a concentraciones en función de la producción. Uno de los casos más reseñables es el de la bodega que presenta una variación estacional importante con



Figura 4. Planta de empresa de refrescos.



Figura 5. Planta de empresa papelera.

concentraciones de hasta 20.000 mg/l en época de vendimia.

La Figura 6 recoge los resultados de DQO filtrada de entrada y salida y la relación carga (eliminada / carga) aplicada obtenidos en la bodega a lo largo de 2001 y parte de 2002.

Respecto a las concentraciones de entrada en la Figura 6a se aprecia claramente una variación importante entre distintos períodos, obteniéndose sin embargo rendimientos de eliminación medios de 90-95 % en DQO filtrada.

Esto puede también apreciarse en la Figura 6b correspondiente a la carga, ya que la relación es lineal en la región del 100%. Por último, hay que señalar que las cargas aplicadas

han sido inferiores a la carga máxima de diseño.

Del mismo modo la Figura 7 recoge los resultados de DQO filtrada de entrada y salida y la relación carga eliminada / carga aplicada obtenidos en la conservera a lo largo de 2001 y parte de 2002.

Los resultados muestran poca variabilidad en el agua de entrada con concentraciones medias de 500-550 mg/l de DQO filtrada y con concentraciones de salida del orden de 100 mg/l de DQO filtrada.

4. Eliminación de materia orgánica y nitrógeno

Así como la eliminación de materia orgánica en el proceso de lecho móvil no presenta, en los aspectos

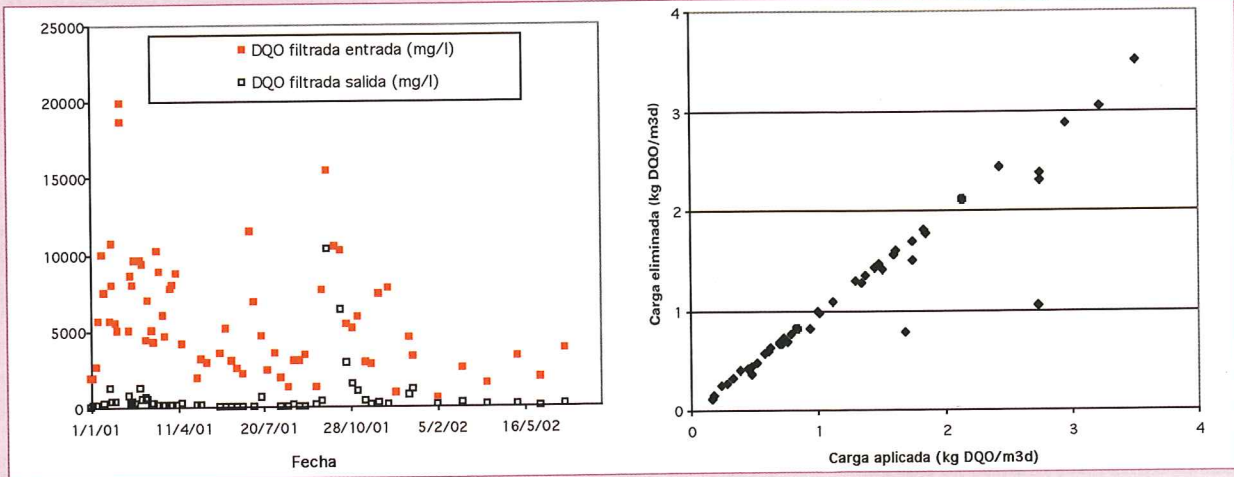


Figura 6. Resultados obtenidos en el período estudiado (6a-izquierda) y relación entre carga aplicada y eliminada (26-derecha).

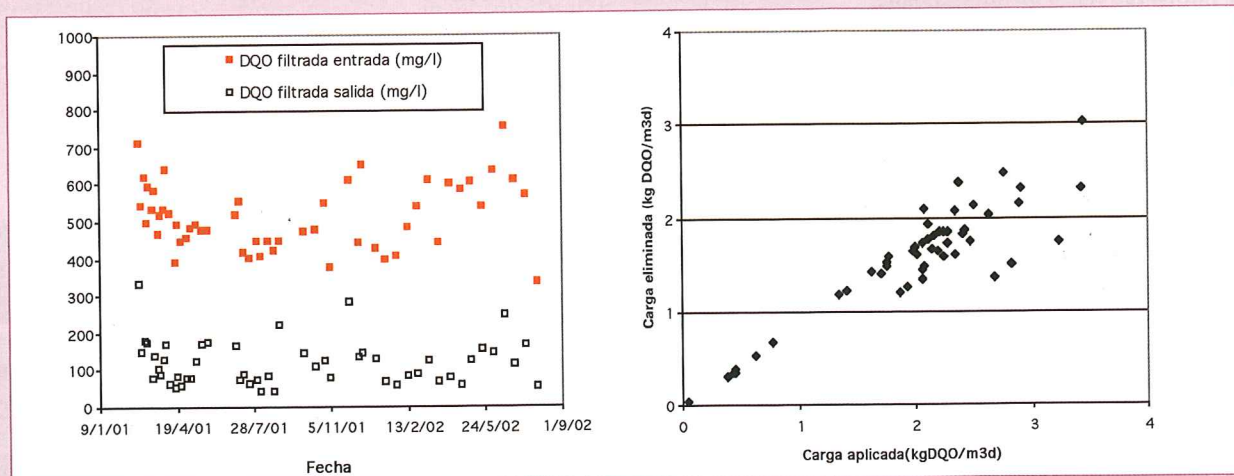


Figura 7. Resultados de la planta depuradora de la conservera.

generales, grandes diferencias respecto a procesos biológicos convencionales, en el caso de la eliminación de materia orgánica y nitrógeno la tecnología de lecho móvil presenta aspectos novedosos relacionados todos ellos a la generación de biopelícula en el reactor biológico.

Existen en bibliografía muchas referencias a estudios en planta piloto, si bien en la actualidad las referencias en planta real, a nivel de eliminación de materia orgánica y nitrógeno, son aún escasas. De todos estos estudios puede extraerse las siguientes conclusiones:

- En el proceso de fangos activos conviven las especies responsables de la eliminación global de nitrógeno, bacterias autótrofas y bacterias heterótrofas. Esto quiere decir, que el crecimiento de una de las especies no dificulta el crecimiento de la otra, sin embargo, en el proceso de lecho móvil el hecho de que sea un proceso biopelícula con las bacterias heterótrofas situadas en la parte más externa de la misma genera ciertas limitaciones para el crecimiento de las bacterias autótrofas.
- Las dificultades de crecimiento de la biomasa autótrofa y en consecuencia de la nitrificación vienen asociadas a la difusión de oxígeno a través de la biopelícula. Es decir, si la concentración de oxígeno disuelto es baja las bacterias heterótrofas situadas en el exterior tienen una actividad superior a las bacterias autótrofas situadas en el interior. En una situación estacionaria la población de bacterias autótrofas llegaría a desaparecer.
- Para evitar este tipo de situaciones las concentraciones de oxígeno con las que se trabaja en reactores aerobios de biopelícula son superiores a los procesos convencionales.
- Por otra parte, las bacterias heterótrofas y autótrofas presentan unas condiciones de crecimiento óptimas bien distintas, mientras

que las primeras son de crecimiento rápido las autótrofas son de crecimiento lento necesitando para ello tiempos de retención celular elevados. Así, en un proceso de fangos activos, en el que conviven ambas especies, es necesario dimensionar para el caso más desfavorable, a pesar de que ello implique un crecimiento y acumulación excesivos de biomasa heterótrofa y de sólidos inertes. Para evitar este último aspecto, el objetivo en procesos biopelícula es la separación del

*El proceso
de lecho móvil
presenta
una reducción
importante
de volumen*

crecimiento heterótrofo y autótrofo y así asegurar el crecimiento óptimo de ambas poblaciones. Por tanto, con una especialización de la biomasa pueden obtenerse tasas de nitrificación y desnitrificación claramente superiores a las que se obtienen en procesos convencionales de biomasa en suspensión.

- Teniendo en cuenta que el proceso convencional de eliminación de nitrógeno sigue siendo el proceso DN, las elevadas tasas en el reactor anóxico se obtienen por una retención de la materia particulada en la biopelícula que propicia procesos de hidrólisis resultando en una eliminación importante de la materia orgánica. Co-

mo consecuencia de esto la fracción de materia orgánica que pasa al reactor aerobio es pequeña asegurando un crecimiento específico de biomasa autótrofa en el reactor aerobio y por tanto la obtención de tasas de nitrificación elevadas.

- Como conclusión final a todos estos aspectos está la reducción importante de volumen que presenta el proceso de lecho móvil para eliminar materia orgánica y nitrógeno respecto a un proceso de fangos activos.

Para corroborar todos estos aspectos se ha llevado a cabo un proyecto de investigación en el que se ha realizado, entre otras cosas, una comparativa, en cuanto a las tasas de nitrificación y desnitrificación, entre dos procesos de lecho móvil para la eliminación de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales urbanas. Este estudio se ha realizado en planta piloto y con agua urbana real. También se ha estudiado la eliminación de fósforo vía química. Las Figuras 8 y 9 muestran el diagrama de flujo de las dos configuraciones.

La Figura 8 representa el proceso convencional que consta de una decantación primaria y un proceso DN con su decantación secundaria. Se trata del proceso más estudiado y con el mayor número de referencias bibliográficas. En la decantación primaria se ha estudiado el efecto de la adición o no de reactivos en los procesos de desnitrificación y nitrificación.

La Figura 9 representa una configuración novedosa que ha surgido con el objeto de conseguir una especialización de la biomasa en cada uno de los reactores. En el decantador se adiciona reactivos con el objeto de la separación de toda la materia orgánica y de la eliminación de fósforo.

4.1. Resultados y discusión

La Tabla 5, que recoge un resumen de los resultados y condiciones operacionales de la experimenta-

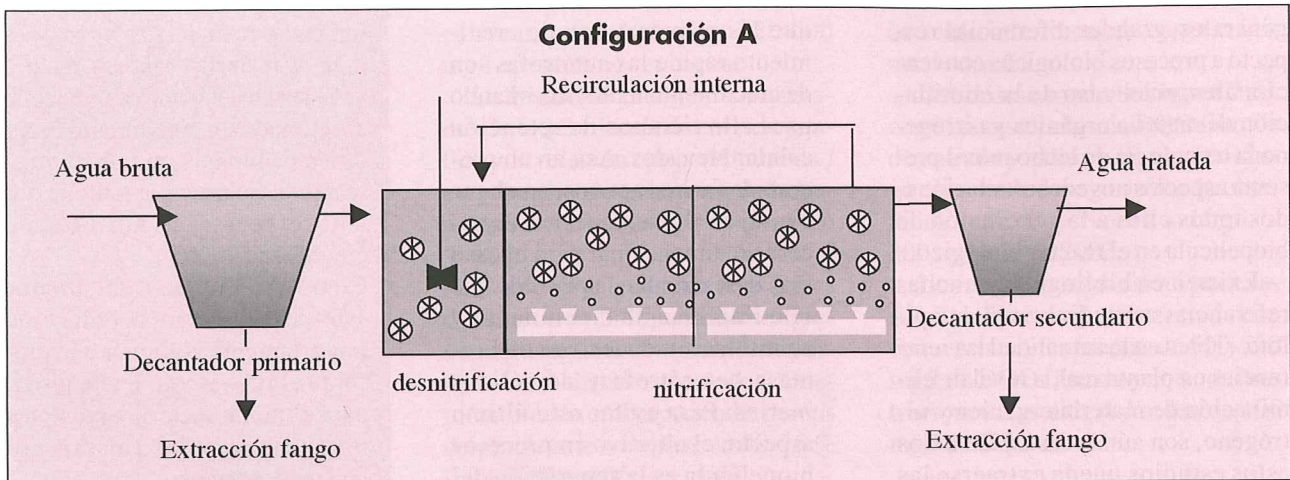


Figura 8.

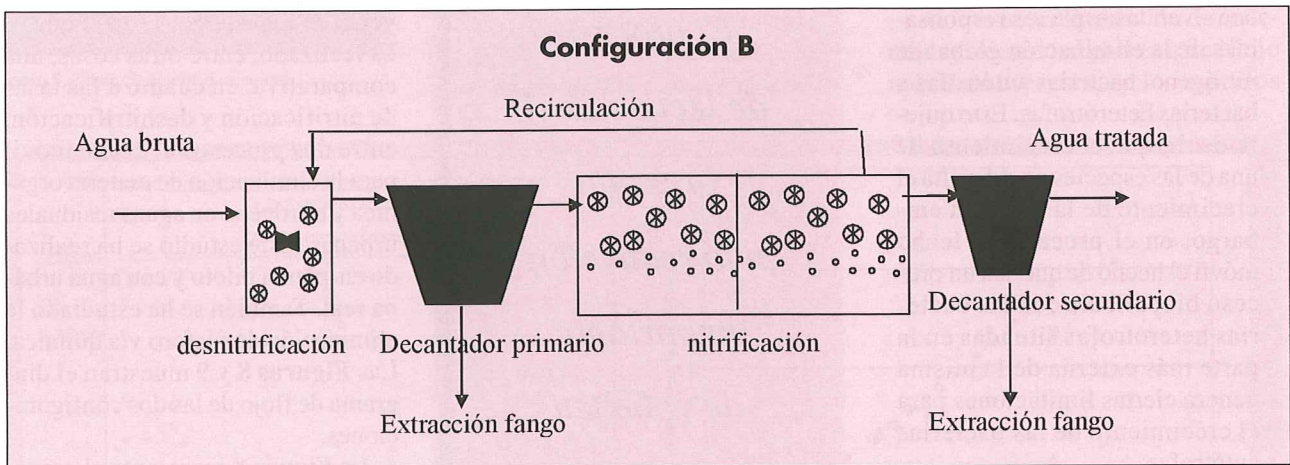


Figura 9.

ción en planta piloto, muestra primeramente que el tiempo de retención hidráulico de 3 horas es muy inferior a los tiempos habituales de procesos de fangos activos de 8-10 horas para procesos de eliminación de materia orgánica y nitrógeno.

Respecto a las tasas de nitrificación y desnitrificación hay que señalar que la configuración B presenta tasas superiores a la configuración A en cualquiera de sus modalidades, con y sin adición de reactivos. La adición de reactivos en la configuración A elimina la materia orgánica particulada en el decantador primario reduciendo la capacidad de desnitrificación en el reactor anóxico (menor tasa de desnitrificación) y el paso de materia orgánica del reactor anóxico al aerobio (mayor tasa de nitrificación). La confi-

Tabla 5			
Condiciones operacionales	Configuración A		Configuración B
Volumen reactor biológico (litros)	100	100	100
Tiempo de retención hidráulico (horas)	3	3	3
Adición de reactivos en decantador primario	no	sí	sí
Temperatura (°C)	15	18	14
Tasas de nitrificación y desnitrificación			
Tasa de nitrificación (grN-NO ₃ /m ³ .d)	130	200	240
Tasa de desnitrificación (grN-NO ₃ /m ³ .d)	130	60	200

Tabla 5. Condiciones operacionales y resultados de la experimentación.

guración B consigue la generación de biomasa heterótrofa en el reactor anóxico y de biomasa autótrofa en el reactor aerobio.

Se observa otro efecto favorable en los menores requerimientos de

oxígeno en el reactor aerobio, consecuencia de que la biopelícula es más fina, estando formada exclusivamente por biomasa autótrofa por lo que no serán necesarias concentraciones muy elevadas de oxígeno

en el reactor para conseguir que se difunda a través de la biopelícula.

Por último hay que señalar que en la configuración B se puede prescindir de decantador secundario ya que la producción de fangos asociada a la biomasa autótrofa es mínima y la concentración de salida entra dentro de los límites permitidos.

5. Conclusiones

La tecnología de lecho móvil se presenta como una tecnología novedosa de fácil implantación, poco requerimiento de espacio y gran sencillez de operación.

La ausencia de bulking filamentos, inherente a los procesos de biopelícula, evita unos de los mayores problemas de operación de las plantas biológicas convencionales de fangos activos.

El soporte plástico AMB Biomedía presenta una superficie específica y tamaño adecuado para esta aplicación.

Como aplicaciones principales se destaca en el campo de las aguas urbanas, tanto el aumento de la capacidad de eliminación de materia orgánica como el de upgrading de plantas para eliminación de nitrógeno, sin necesidad de obra civil. En el campo de aguas residuales industriales, es de gran aplicación en sectores en el que las aguas contienen elevadas concentraciones de DQO filtrada; sector vinícola, agroalimentario, lácteas, refrescos, papeletras, mataderos...

En cuanto a la eliminación de materia orgánica y nitrógeno, la nueva configuración, proceso B que sitúa el decantador primario entre el reactor anóxico de desnitrificación y los reactores aerobios de nitrificación, ha mostrado unas capacidades de nitrificación y desnitrificación que superan a las obtenidas por las configuraciones habituales que emplean el decantador primario en cabeza de los reactores.

En adición, otras ventajas observadas son que los requerimientos de oxígeno en los reactores aerobios son menores y que sería posible

prescindir del decantador secundario. Se considera que el aspecto más delicado de la nueva configuración reside en asegurar el correcto funcionamiento del decantador intermedio que estará sometido a caudales elevados y variables.

6. Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Sociedad para la Promoción y Reversión Industrial (SPRI) promovida por el Gobierno Vasco y que, a través del programa INTEK de apoyo a las actividades de investigación, desarrollo e innovación tecnológica (Plan de Ciencia, Tecnología e Innovación 2001-2004) ha permitido la realización del proyecto titulado 'Optimización del diseño y operación de sistemas de biomasa adherida a soporte en lecho móvil para el tratamiento de aguas residuales en núcleos autónomos de población y en aguas industriales' y que parte de resultados quedan recogidos en el presente artículo. En dicho proyecto han participado además de ATM, CEIT (Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipúzcoa), Diputación Foral de Guipúzcoa, Consorcio de Aguas de Guipúzcoa y Goimendi.

Por otra parte agradecer a NILSA por la transferencia de información de los resultados referentes a sus instalaciones.

7. Bibliografía

[1] Andreottola, G.; Foladori, P.; Ragazzi, M.; Tatano, F. (2000). Experimental comparison between MBBR and activated sludge system for the treatment of municipal wastewater. *Wat. Sci. Tech* 41, 4-5, 375-382.

[2] Andreottola, G.; Foladori, P.; Ragazzi, M.; Villa, R. (2002). Treatment of winery wastewater in a sequencing batch biofilm reactor. *Wat.Sci.Tech* 45, 12, 347-354.

[3] Chudoba, P.; Pujol, R. (2000). Technical solutions for upgrading high rate and medium loaded activated sludge plants for

nutrient removal. *Wat.Sci.Tech.* 41, 9, 131-138.

[4] Maurer, M.; Fux, C.; Graff, M.; Siegrist, H. (2001). Moving-bed biological treatment (MBBT) of municipal wastewater: denitrification. *Wat.Sci.Tech.* 43, 11, 337-344.

[5] Münch, E.v; Barr, K.; Watts, S.; Keller, J. (2000). Suspended carrier technology allows upgrading high-rate activated sludge plants for nitrogen removal via process intensification. *Wat.Sci. Tech* 41, 4-5, 5-12.

[6] Adegard, H. (2000). Advanced compact wastewater treatment based on coagulation and moving bed biofilm processes. *Wat.Sci.Tech.* 42, 12, 33-48.

[7] Orhon, D.; Tah, R.; Sözen, S. (1999). Experimental basis of activated sludge treatment for industrial wastewaters-the state of the art. *Wat.Sci.Tech.* 40, 1, 1-11.

[8] Parker, D.S.; Rusten, B.; Wien, A.; Siljudalen, J.G. (2002). A new process for enriching nitrifiers in activated sludge through separate heterotrophic wasting from biofilm carriers. *Wast.Env.Res* 74, 1, 68-76.

[9] Pastorelli, G.; Andreottola, G.; Canziani, R.; Darriulat, C.; Fraja Frangipane, E.; Rozzi, A. (1997). Organic carbon and nitrogen removal in moving-bed biofilm reactors. *Wat.Sci.Tech.* 35, 6, 91-99.

[10] Rusten, B.; Siljudalen, J.G.; Nordeidet, B. (1994). Upgrading to nitrogen removal with the KMT moving bed biofilm process. *Wat.Sci.Tech* 29, 12, 185-195.

[11] Rusten, B.; Hem, L.J.; Adegard, H. (1995). Nitrification of municipal wastewater in moving-bed biofilm reactors. *Wat.Env.Res.* 67, 1, 75-86.

[12] Vanhooren, H.; Yuan, Z.; Vanrolleghem, P.A. (2002). Benchmarking nitrogen removal suspended-carrier biofilm systems using dynamic simulation. *Wat.Sci.Tech.* 46, 1-2, 327-332.