

EL CONTROL DE LA FORMACIÓN FLOCULAR EN LA E.D.A.R.: IMPLICACIONES EN LA REDUCCIÓN DE CARGA ORGÁNICA Y NUTRIENTES.

Grupo Bioindicación Sevilla: Laura Isac (Licenciada en Biología, RNM310 Universidad de Sevilla), Eva Rodríguez (Licenciada en Biología, SEAFSA), Natividad Fernández (Licenciada en Química, DAM-PRIDES), y M^a Dolores Salas (Licenciada en Biología, Itsmo'94).

<http://www.grupobioindicacionsevilla.com>

Publicado en: Ecoportal: Junio 2004.

Coordinadora: Carmen Santos Lobatón.

IDEA FUNDAMENTAL: Una buena gestión en las E.D.A.R.s reduce los riesgos ambientales en los cauces receptores, siendo el control de la formación flocular en el reactor biológico uno de los ensayos fundamentales para determinar las alteraciones en el proceso de depuración. En este trabajo se propone un sistema de análisis rápido y fácil con el que establecer la calidad del estado de formación del floculo de fango activo.

MAIN IDEA: A good management in the wastewater treatment plants reduces the environmental risks in the receiving courses. The control of the flocular formation in the biological reactor (activated sludge process) is one of the fundamental essays to determine the alterations in the process of depuration. The aim of this work is to establish a quick method to achieve this purpose.

RESUMEN: Los aportes de aguas residuales a los cauces receptores son el origen de diversos problemas de alteraciones de la biota establecida en estos ecosistemas, generando sobre todo empeoramiento en los procesos de eutrofización y degeneración de la microfauna presente, debido al aporte de nutrientes (nitrógeno y fósforo) que este tipo de agua presenta (Stapleton *et al.*, 2000).

La legislación tanto comunitaria como española exige la implantación de procesos de depuración de estas aguas a fin de disminuir el impacto ambiental que producen (ley de aguas de 2 de Agosto de 1985 y posteriores revisiones y Normativa de vertido comunitario 91/271/CEE).

Dentro de los procesos depuradores, el más común y efectivo es el de la oxidación de la materia orgánica de forma aerobia en el proceso de fangos activados. Este proceso implica el desarrollo de determinadas bacterias que, además de oxidar la materia orgánica y reducir el contenido en nutrientes de las aguas, generan un efecto floculador que permite la posterior separación de fases, lo que consigue reducciones de DBO₅ del 95 % y de nitrógeno y fósforo del 20-40 %. Estas últimas pueden llegar al 80 % en sistemas de eliminación específicos para estos nutrientes, obligatorios para vertidos a zonas sensibles a la eutrofización.

Una valoración de las características del cultivo depurador tanto a nivel macroscópico como microscópico (IF), que permita estimar el efecto floculador de las bacterias presentes frente al crecimiento disperso, aporta información sobre las condiciones de explotación en la planta de tratamiento y sobre los rendimientos de eliminación de carga orgánica y nutrientes.

INTRODUCCIÓN.

El agua se cuenta como uno de los recursos más preciados en el mundo, cuya conservación debe implicarnos a todos. En la legislación medioambiental, un punto importantísimo es el control de los vertidos de las zonas con riesgo de eutrofia. La *Urban Waste Water Treatment* (organismo incluido en el Instituto Europeo de Policía Ambiental, IEPP) ha clasificado todas las áreas sensibles de los Estados miembros con riesgo de eutrofia que necesitan la eliminación de nitrógeno y fósforo (Mainstone y Parr, 2002),

siendo las aglomeraciones urbanas, los usos agrícolas y la deforestación los principales causantes de este fenómeno.

La descomposición y el reciclado de la materia orgánica presentan comportamientos semejantes en toda clase de sistemas. Sin embargo, factores ambientales que han operado raramente y que no han sido internalizados por la evolución (metales pesados, plaguicidas, etc.) coinciden frecuentemente con la contaminación orgánica y complican la dinámica de los respectivos ecosistemas (Margalef, 1983).

Los vertidos incontrolados pueden provocar el desarrollo masivo de algas, lo que genera proliferaciones de organismos oportunistas que degradan el sistema. Cambios en la comunidad vegetal, a su vez, pueden ser causa de severos déficits de oxígeno disuelto que resultan mortales para los organismos más sensibles (Mainstone y Parr, 2002). Esta situación provoca problemas colaterales como pueden ser los malos olores y el deterioro sanitario y paisajístico de las aguas.

Desgraciadamente, la eutrofización de muchas zonas acuícolas es patente, presentando aumentos en los niveles de nutrientes consecuencia de la descarga de aguas residuales (Stapleton *et al.*, 2000). Esta situación se está solventando con las medidas legislativas recogidas en la Directiva 271/91 y con su incorporación en España mediante el RDL 11/1995 y RD 509/1996 (Tabla I).

Tabla I. Límites de vertidos (limitaciones de nutrientes en zonas sensibles cuyas aguas sean eutróficas o tengan tendencia a serlo en un futuro próximo¹).

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN	% RED MÍNIMO
DBO₅	25 mg/L	70-90 %
DQO	125 mg/L	75%
SS	35 mg/L (> 10.000 h-e)	90%
	60 mg/L (20.000-10.000 h-e)	
FÓSFORO TOTAL	2 mg P/L (10.000-100.000 h-e)	80%
	1 mg P/L (>100.000 h-e)	
NITRÓGENO TOTAL	15 mg N/L (10.000-100.000 h-e)	70-80 %
	10 mg N/L (>100.000 h-e)	

De hecho, en algunos estados de Europa dónde las medidas de saneamiento empezaron a implantarse en los años setenta, se ha producido la recuperación de la calidad físico-química de las aguas (Prat, 1997).

¹ Mas del 40% de los embalses españoles presentan riesgo de eutrofia; sin hablar de otros sistemas acuáticos (Prat, 1997).

Si tenemos en cuenta los datos aportados por el Ministerio de Medio Ambiente (2001) sobre la depuración, Andalucía presenta una población equivalente de 13.694.385 con un porcentaje de depuración correcto del 37 %, un 20 % en construcción y un 43 % no depurado.

Las inversiones realizadas en Andalucía gracias a la financiación en un 80 % de los Fondos de Cohesión Europeos de las Obras de Saneamiento y Depuración de aguas residuales en núcleos de la red de Espacios Naturales de la Comunidad Autónoma de Andalucía, asciende a 25.993.431 euros (Leal *et al.*, 2002).

Esta favorable evolución choca en muchas ocasiones con procesos de depuración inadecuados en muchas ciudades, supeditados a las condiciones socio-económicas, niveles de vida y rentas per cápita imperantes (Leal *et al.*, 2002), que no permiten a los municipios el mantenimiento de la E.D.A.R. tras su puesta en marcha. Si a esto le añadimos que durante los meses de verano en muchos lugares de la costa mediterránea el flujo de los ríos consiste esencialmente en agua residual tratada o no (Angelakis *et al.*, 1999), es obvia la necesidad de una gestión óptima, en la que el balance entre costes de mantenimiento y vertido depurado sea el menor posible.

Por ello es necesario disponer de medidas de control complementarias a los parámetros físico-químicos. Estas medidas, en parte, podrían estar representadas por el control de la formación flocular en el reactor biológico, el cual aporta información adicional sobre el proceso y permite con personal técnico especializado controlar varias estaciones depuradoras de fangos activos con una dotación extra de laboratorio escasa (microscopio óptico y material de tinciones). Sin embargo y como contrapartida, los estudios de formación flocular del fango activo requieren tiempo, personal especializado y una ardua tarea de identificación y análisis de los resultados que normalmente no están al alcance de todos los laboratorios.

En este trabajo, se plantea la posibilidad de realizar un estudio simplificado del fango activo que genere, en función de las características macroscópicas y microscópicas de éste, un valor de índice de fango que esté directamente relacionado con los porcentajes de reducción de SS, DQO, DBO, Nitrógeno y Fósforo en la E.D.A.R. Tal índice de fango (IF), además, proporciona la posibilidad de obtener un histórico de valores de calidad biológica de forma rápida, comparable y protocolo sencillo.

Este sistema de análisis, cuyo resultado final es la evaluación de la calidad de un fango biológico, en el desarrollo de su metodología ha tomado como base información

especializada, de la que se destacaría el " Manual de Laboratorio para el análisis de las aguas residuales y lodos de depuración" (Departamento de Agua y Saneamiento del Ayuntamiento de Madrid, 1997). A partir de la puntuación de una serie de características macroscópicas del fango (observables a través de la V_{30}) y microscópicas (observables a través de un objetivo de 10X), se obtiene un valor final comprendido entre 0-100 con el que quedaría definida la calidad de dicha suspensión biológica. Este valor se denomina *Índice de Fango (IF)* (Jiménez *et al.*, 2001).

DESARROLLO INVESTIGADOR DEL "ÍNDICE DE FANGO" Y RESULTADOS.

La selección de los parámetros que definen y valoran las características del fango activo, constituyó uno de los pasos previos en la elaboración del índice. A continuación, se estableció un periodo de contraste de resultados de algo más de un año, en el que se estudiarán diversas muestras de fangos activos de toda Andalucía, lo que permitió someter a estudio el índice elaborado así como la unificación de criterios para los componentes del grupo de trabajo, requisitos indispensables para la obtención de resultados representativos del estado del sistema, a la vez que comparables.

Los parámetros seleccionados para constituir el IF, denominados características macro y microscópicas, se encuentran recogidos en la Tabla 2 junto con las distintas variantes con las que dichas características quedaron definidas. Como características macroscópicas se entienden aquellas observables a simple vista, extraídas del aspecto del fango activado y del clarificado de la V_{30} . Como características microscópicas se definen aquellas otras observables a través del microscopio bajo un objetivo de 10x. Respecto a estas últimas, aclarar que las observaciones deben realizarse al menos por duplicado y con la muestra viva (sin teñir). Ésta, que ha de ser lo más fresca posible, es conveniente agitarla con suavidad previamente, para homogenizar evitando la rotura de los flóculos. Las identificaciones bacterianas se han realizado en base al manual Microorganismos filamentosos en el fango activo (EMASESA, 1997) y apoyadas en distintos artículos que tratan el tema (Eikelboom, 1975 y 1977; Rozhich, 1982; Suárez, 1993; Laboratorio Central del Dep. de Saneamiento del Ayto de Madrid, 1996; Moro, 1998).

Tabla 2. Valoración del IF.

CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS		
Turbidez	Alta	0
	Media	4,5
	Baja	9

Flóculos en suspensión	Alta	0
	Media	4,5
	Baja	9
Sedimentabilidad	Alta	9
	Media	4,5
	Baja	0
Olor	Correcto	3
	Incorrecto	0

Tabla 2. Valoración del IF (continuación).

CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS		
Forma	Regular	4
	Irregular	0
Tamaño	Grande	4
	Medio	7
	Pequeño	0
Estructura	Compacta	18
	Media	9
	Abierta	0
Textura	Fuerte	4
	Débil	0
Cobertura	< 10%	0
	10-50%	7
	>50%	3,5
Filamentos en flóculos	>20	0
	5-20	7
	<5	14
Filamentos en disolución	Alta	0
	Baja	3
Diversidad de Protozoos	>7 especies	13
	4-7 especies	7
	<4 especies	0
ÍNDICE DE FANGO	TOTAL	

La suma de puntuaciones para ambos grupos de características se traduce en un valor final de índice de fango del que se definen cinco categorías, cada una de las cuales alude a una calidad distinta del fango (Tabla 3). Mientras que las características macroscópicas presentan como valor máximo de puntuación 30 unidades sobre el valor del IF, las microscópicas presentan un máximo de puntuación de 70 puntos, al considerarse que son éstas las que definen con mayor exactitud el IF.

Tabla 3. Categorías de IF.

ÍNDICE DE FANGOS:
0-20 pésimo
20-40 malo

40-60 regular
60-80 bueno
80-100 óptimo

De los estudios realizados en distintas EDAR se obtuvieron distintos resultados de IF que se relacionarán con los porcentajes de reducción de SS, DQO, DBO, N y P. Los análisis de estos últimos se realizaron según los Métodos Normalizados (APHA, AWWA y WPCF, 1992).

Del periodo de estudio se obtuvieron 109 datos, los cuales aparecen reflejados en la Tabla 4, y a los que se realizó un análisis estadístico de correlaciones. En tal estudio se pretendía buscar una posible relación entre el valor del IF y los parámetros que definen tanto el influente como la calidad del efluente (SS, DQO, DBO, N y P).

Tabla 4. Relación de datos obtenidos en el estudio de cada uno de los participantes.

Total datos	
Participante 1	10
Participante 2	38
Participante 3	13
Participante 4	19
Participante 5	29

El análisis de los datos demostró la ausencia de una relación directa entre el Índice de fango y los SS, DQO, DBO, N y P tanto del agua de entrada como de salida. Sin embargo, cuando los datos fueron agrupados según la categoría de IF, se encontró, tal y como se muestra en la Figura 1, una relación directa entre los porcentajes de reducción de SS y DQO respecto al IF, si bien esta relación es más clara para el caso de los sólidos en suspensión que para la DQO. Como se observa en esta misma figura, la relación establecida entre la DBO y el Índice de fango no es del todo clara, al no detectarse diferencias significativas entre los porcentajes de reducción una vez que los índices de fango superan la calidad “pésima”. No se ha encontrado explicación a esta falta de proporcionalidad entre la calidad del fango estimada mediante el IF y el porcentaje de reducción de DBO. No obstante, la extrema variabilidad y escasa reproducibilidad de esta determinación (APHA, AWWA y WPCF, 1992), junto con la inferioridad de datos aportados respecto a los SS y DQO, son razones suficientes para que este resultado sea tomado con precaución.

Reflexiones similares se pueden hacer con respecto a los datos de reducción de Nitrógeno y Fósforo (Figura 2), en los que los resultados obtenidos están adscritos a tres categorías de fango (“malo”, “regular” y “bueno”). Por lo tanto, si bien la tendencia es a una mejora gradual de los porcentajes de reducción de ambos nutrientes frente al aumento

de puntuación del índice, las diferencias más claras se encuentran entre la categoría “malo” y el resto. Estos resultados, por tanto, habrían de ser tomados con reservas, ya que parece conveniente ampliar el banco de datos antes de determinar la tendencia más clara posible.

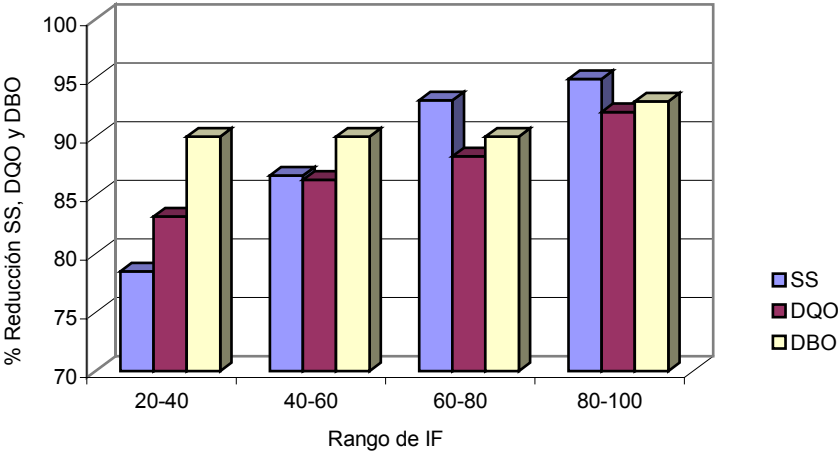


Figura 1. Relación entre el rango de IF y el porcentaje de reducción de SS (n = 109), DQO (n = 109) y DBO (n =67).

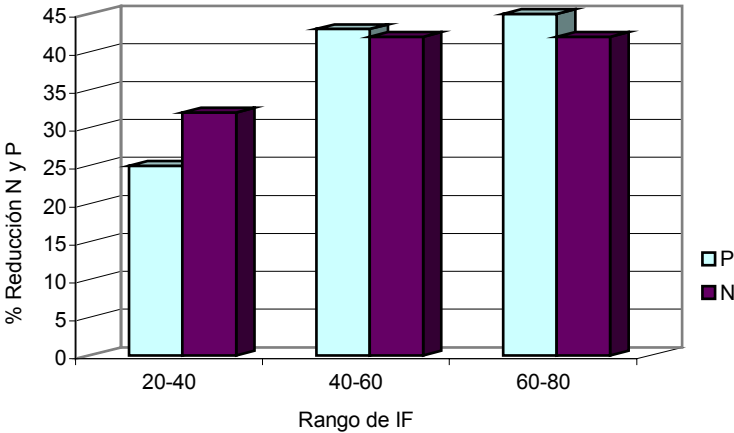


Figura 2. Relación entre el rango de IF y el porcentaje de reducción de nitrógeno y fósforo (n=67).

En la Figura 3 se ilustran distintos estados de floculación observados durante el estudio y los valores de IF asociados.

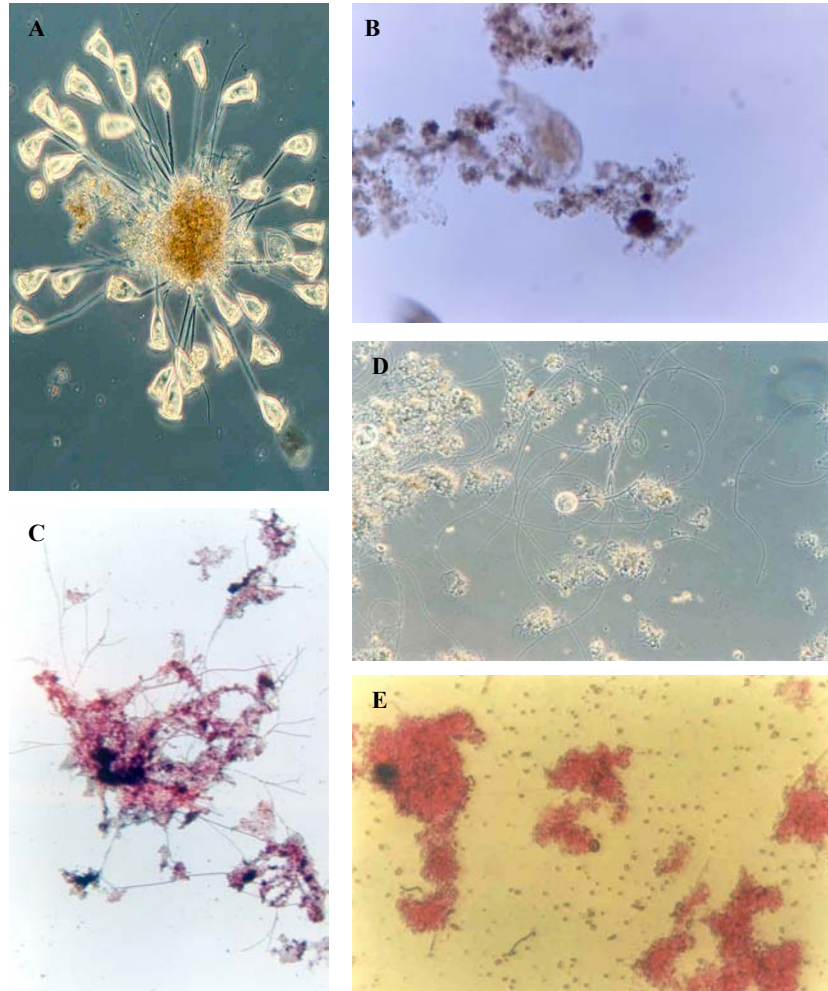


Figura 3. Distintos estados de formación flocular. (A) Flóculo de fango activo “ideal” (IF “óptimo”); 100x, contraste de fases. (B) Flóculo de fango activo bien formado en sistema con elevada edad de fangos (IF “bueno”); 100x, campo claro. (C) Estructura flocular abierta por la proliferación del filamento *Sphaerotilus natans* (IF “malo”); 400x, campo claro, tinción Gram. (D) Disgregación flocular ocasionada por episodio de *bulking* filamentoso (IF “malo”); 100x, contraste de fases. (E) Crecimiento disperso local (IF “regular”); 400x, campo claro, tinción Gram.

CONCLUSIONES.

El parámetro IF ha resultado ser un buen sistema de control rápido con el que obtener un índice de formación flocular, orientativo del estado del cultivo biológico, que nos aproxima a los rendimientos de depuración en las E.D.A.R.s de fangos activos. En general, podemos definir el Índice de Fango (IF) como un parámetro indicador del estado de floculación en el reactor biológico, que nos aporta información para modificar las condiciones del cultivo y de esta forma mejorar la eficacia de la reducción de la DQO y los SS en las E.D.A.R.s, tomándose con reserva las relaciones que mantiene con la DBO, Nitrógeno y Fósforo. Una observación general del fango activado que puede durar unos veinte minutos, nos proporcionará idea del estado de éste y de la respuesta esperable de la E.D.A.R. convencional.

Es necesario aumentar el número de datos y proseguir con el estudio antes de poder definir claramente al IF respecto a los porcentajes de reducción de DBO, N y P, como un recurso para optimizar la reducción de la emisión de nutrientes y materia orgánica al cauce receptor.

El IF es un complemento analítico aplicable a plantas depuradoras de fangos activos de grandes núcleos de población, en las que a través de la observación del estado de floculación se podrá valorar la calidad del proceso de depuración, entendida ésta como rendimientos depuradores. En plantas pequeñas se presenta como un sistema idóneo, dónde con reducidos costes un mismo especialista puede controlar las condiciones de explotación de varias E.D.A.R.s. Si a esto último añadimos que muchas de estas plantas pequeñas se encuentran localizadas en zonas sensibles (Oron *et al.*, 2002), la aplicación del IF como parámetro complementario sería muy deseable.

La valoración del estado de floculación de la materia orgánica permite tomar medidas encaminadas a la mejora de este proceso para así obtener buenos clarificados y reducir de esta forma la emisión de contaminantes. En determinadas situaciones, alteraciones en la línea de fango producen reboses a cabecera sépticos que generan una microfauna especializada para el metabolismo del azufre. Esta microfauna está normalmente asociada a alteraciones en la decantabilidad de los fangos y por lo tanto a la fuga de sólidos al cauce receptor, lo que lleva aparejado el escape de organismos (*Bodo* spp., *Cercobodo* spp., *Sphaerotilus* spp., *Thiotrix* spp....) que llegan al medio acuícola desarrollándose y alterando el ecosistema.

Por otra parte, es sabido que una gran proporción de la estructura del flóculo de fango activo está compuesta por polímeros extracelulares (EPS, *extracellular exopolymers*), los cuales son considerados como los principales responsables de la adhesión de las células microbianas a la estructura flocular y de la cohesión del conjunto. Las propiedades adsorbentes de los EPS han sido bien documentadas por distintos autores en términos de bioadsorción de contaminantes y tóxicos (iones metálicos, por ejemplo). Sin embargo, el papel de los EPS en la eliminación biológica de nutrientes como el nitrógeno o el fósforo no ha sido abordado hasta muy recientemente debido a la falta de herramientas adecuadas. Cloete y Oosthuizen (2001) haciendo uso del análisis mediante EDS (*Energy Dispersive Spectrometry*) y microanálisis con rayos X, han estimado que la proporción de fósforo en los cúmulos bacterianos de una muestra de fango activo procedente de una planta en la que existe eliminación biológica de fósforo, es de un 57-59% del total. Estos mismos autores encontraron que los EPS aislados de muestras biológicas de igual procedencia, retuvieron, por sí solos, entre el 27-30% del total del fósforo estimado. Estos resultados sugieren que la eliminación de fósforo en el fango activo podría ser debida no sólo a los organismos acumuladores de fosfato, sino también al EPS como reservorio de este elemento. Con esta explicación, lo que quiere significarse es que la detección precoz mediante el IF de alteraciones en el estado de floculación, evitará en buena proporción no sólo la liberación de sólidos con el efluente, sino también de nutrientes a los cauces receptores.

En definitiva, el IF se establece como un sistema práctico del control de la formación flocular en la E.D.A.R. y como un útil complemento en la determinación de las condiciones de explotación, repercutiendo positivamente sobre el medio ambiente.

AGRADECIMIENTOS.

Queremos dejar constancia de nuestro agradecimiento a la Empresa Municipal de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla S.A. (EMASESA), por su apoyo y potenciación de este tipo de controles biológicos, por cedernos sus instalaciones para nuestras reuniones y por proporcionarnos los medios para la realización de este estudio.

Nuestro agradecimiento también a cada una de las empresas y centros a los que pertenecemos.

BIBLIOGRAFÍA.

- Angelakis, A., Marecos do Monte, M. H. F., Bontoux, L., Asano, T. (1999). The status of wastewater reuse practice in the Mediterranean basin: need for guidelines. *Wat. Res.* 33, 10, 2201-2217.
- APHA, AWWA, WPCF (1992). *Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Ed. Díaz de Santos, Madrid.
- Cloete, T. E. y Oosthuizen, D. J. (2001). The role of extracellular exopolymers in the removal of phosphorus from activated sludge. *Wat. Res.* 35, 15, 3595-3598.
- Departamento de Agua y Saneamiento del Ayuntamiento de Madrid (1997). *Manual de laboratorio para el análisis de aguas residuales y lodos de depuración*. Publicación del Exmo. Ayuntamiento de Madrid.
- EMASESA, Departamento de Aguas Residuales (1997). *Microorganismos filamentosos en el fango activo*. Publicación de la Empresa Municipal de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla, S.A. (EMASESA).
- Eikelboom, D. H. (1975). Filamentous organisms observed in activated sludge. *Wat. Res.* 9, 365-388.
- Eikelboom, D. H. (1977). Identification of filamentous organisms in bulking activated sludge. *Wat. Tech.* 8.
- Jiménez, C., Fernández, N., de la Horra, J. M., Rodríguez, E., Isac, L., Salas, D. y Gómez, E. (2001). Sistema rápido de estimación de los rendimientos en depuración de una E.D.A.R. en función de las características macroscópicas y microscópicas del fango activado. *Tecnología del Agua* 216, 40-44.
- Laboratorio Central del Departamento de Saneamiento del Ayuntamiento de Madrid (1996). *Observación microscópica del fango activo: caracterización del flóculo e identificación de microorganismos filamentosos*. Jornadas Prácticas del 20-24 de mayo de 1.996.
- Leal, A., Viñas, L., López, A. J., Navarro, M. y Martínez, M. (2002). Depuración de aguas residuales en espacios naturales protegidos de Andalucía. Junta de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente.

- Mainstone, C. y Parr, W. (2002). Phosphorus in rivers. Ecology and management. *The Science of the total Environment* 282-283, 25-47.
- Margalef, R. (1983). *Limnología*. Ed. Omega. Barcelona.
- Moro, P. (1998). Aparición de organismos filamentosos en fangos activos. *Ingeniería Química*, Junio 1998, 97-106.
- Oron, G., Bicz, A. y Gillerman, L. (2002). Trends and opportunities for small-scale wastewater treatment and reclamation plants in the Eastern Mediterranean Basin. Libro de ponencias principales del *Congreso Internacional de Tecnologías de Pequeña Escala para la Depuración y Gestión de aguas residuales en el Ámbito Mediterráneo*, 113-130. Sevilla, 20-22 de marzo, 2002.
- Prat Fornells, N. (1997). Estado ecológico de los ecosistemas acuáticos en España. www.us.es/ciberico/narcisprat.pdf
- Rozhich, F. (1982). Control of algal filamentous bulking at the southerly wastewater treatment plant. *Journal W.P.C.F.* 54, 3.
- Stapleton, C. M., Kay, D., Jackson, G. F. y Wyer, M. D. (2000). Estimated inorganic nutrient inputs to the coastal waters of Jersey from catchment and waste water sources. *Wat. Res.* 34, 3, 787-796.
- Suárez, J., Llorente, V. y Mogollón, T. (1993). Microorganismos filamentosos en las E.D.A.R.s. *Ingeniería Química*, Enero 1993, 146-151.