

Parámetros fisicoquímicos asociados a la proliferación de bacterias filamentosas (Bulking filamentosos) en las plantas de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados: revisión sistemática

Physicochemical parameters associated with the proliferation of filamentous bacteria (filamentous bulking) in wastewater treatment plants using activated sludge: a systematic review

Lina Marcela Balcárcel G.* †, Paola Nathaly Erazo H.* ‡, Ana Milena Vides G.* †, Auxilio Ramírez P. ‡

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), que implementan el proceso de lodos activados presentan problemas de bulking filamentosos. Se ha encontrado que los morfotipos más comunes ligados al fenómeno son: *Microthrix parvicella*, *Thiothrix* spp., *Nostocoida limicola*, *Sphaerotilus natans*, Tipo 0041 y *Haliscobenobacter hydrossis*. La asociación de los parámetros fisicoquímicos en el sistema con la aparición del bulking es divergente en todos los estudios.

OBJETIVO

Describir los parámetros físico-químicos que condicionan la proliferación de morfotipos bacterianos en el fenómeno de bulking filamentosos, mediante el análisis comparativo de diversos estudios a nivel mundial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se hizo una revisión sistemática a partir de artículos de investigación publicados en los últimos 18 años, en las bases de datos Science Direct, Scielo, Web of Knowledge, EBSCO, Wiley, y Springer Link.

RESULTADOS

Se seleccionaron 15 artículos, éstos se organizaron según el tamaño de planta. Se encontró que los parámetros con mayor incidencia en la proliferación de las bacterias filamentosas son: la baja concentración de OD, la baja relación F/M, baja temperatura y el tipo de agua a tratar. Los parámetros indicadores de la presencia de bulking en la mayoría de estudios son el IVL, el IF y los morfotipos filamentosos.

CONCLUSIÓN

No hay consenso en los valores de los parámetros fisicoquímicos de las PTAR asociados a la proliferación de bacterias filamentosas. Sin embargo, su proliferación puede depender de muchos factores como la entrada masiva de sustrato fácilmente asimilable, las bajas temperaturas y disponibilidad de oxígeno disuelto por unidad de carga orgánica.

PALABRAS CLAVES

Bacterias filamentosas, bulking, índice volumétrico de lodos, lodos activados.

*Estudiantes Microbiología Industrial y Ambiental. †Profesora Escuela de Microbiología, Universidad de Antioquia. ‡Contacto: paola.erazo_hi@hotmail.com
Recepción: 04-03-2013. Aceptación: 05-31-2013.

ABSTRACT

INTRODUCTION

Activated sludge system for Wastewater treatment plants present problems such as filamentous bulking. It was found that the most common morphotypes linked to this phenomenon are: *Microthrix parvicella*, *Thiothrix* spp., *Nostocoida limicola*, *Sphaerotilus natans*, Type 0041 and *Haliscomenobacter hydrossis*. The Association of the physicochemical parameters in the system with the bulking diverges in all the studies.

OBJECTIVE

To describe the physicochemical parameters that influence the proliferation of bacterial morphotypes in filamentous bulking phenomenon, through the comparative analysis of several worldwide studies.

MATERIALS AND METHODS

A systematic review was made from original research articles published in the last 18 years, found in databases such as Science Direct, Scielo, Web of Knowledge, EBSCO, Wiley, and Springer Link.

RESULTS

Fifteen articles were selected and organized according to the plant size. It was found that the most shocking parameters on filamentous bacteria proliferation are: low DO, low F/M rate, low temperature and wastewater type. The Most common parameters indicating presence of bulking through studies are SVI, FI and filamentous morphotypes.

CONCLUSIONS

There is no consensus among physicochemical parameters values associated to filamentous bacteria proliferation in WWTP's. However, bacterial proliferation may depend of many factors such as the input of easily available substrate, low temperature and availability of dissolved oxygen per unit of organic load.

KEY WORDS

Activated sludge, bulking, filamentous bacteria, filamentous index, sludge volume index.

INTRODUCCIÓN

El proceso de depuración de aguas residuales mediante el uso de lodos activados consiste en la oxidación biológica de materia orgánica, que genera como resultado biomasa y gases. Este proceso se caracteriza por la sedimentación y posterior remoción de sólidos sedimentables mediante la formación de flóculos. Un flóculo es un agregado de diversos microorganismos y partículas orgánicas e inorgánicas, que permite un mayor aprovechamiento del sustrato, dada la cercanía entre las poblaciones que lo componen y la presencia de zonas aerobias, anóxicas y en ocasiones anaerobias; a medida que el tamaño del flóculo aumenta, disminuye el número de bacterias aerobias por la limitación en la difusión del oxígeno y se favorece la aparición de bacterias como las metanogénicas o reductoras de sulfato.¹ Los flóculos están conformados principalmente por bacterias formadoras de floc y bacterias filamentosas cuya interacción es la responsable de la degradación de la materia orgánica. Las bacterias filamentosas usualmente permanecen en el interior de los flóculos, sin embargo bajo condiciones de estrés, por ejemplo en aguas residuales con baja relación sustrato/microorganismo (F/M) y bajas concentraciones de oxígeno disuelto (OD), tienden a prolongar sus filamentos para abastecer sus necesidades nutricionales lo que produce a su vez, dominancia respecto a las bacterias floculantes y en consecuencia la aparición del bulking filamentoso.^{2,3,4}

Las bacterias filamentosas juegan un papel muy importante, ya que forman el esqueleto al cual se adhieren las bacterias formadoras de floc⁵ gracias a sustancias poliméricas extracelulares que éstas producen, manteniendo el flóculo firme y compacto, sin embargo, cuando el crecimiento de microorganismos filamentosos es excesivo, los flóculos se tornan débiles, abiertos y con espacios en su interior, lo que afecta negativamente las propiedades del lodo, el cual se vuelve menos denso y esponjoso.⁶ Este fenómeno conocido como bulking filamentoso provoca el deterioro del proceso, ya que el lodo no sedimenta de forma adecuada, la biomasa es lavada y se escapa con el efluente del clarificador secundario, provocando la pérdida de sólidos suspendidos y un efluente con alta carga orgánica.⁷

En casi la mitad de las PTAR con lodos activados, es común que se presente un bajo índice de sedimentación de lodos, siendo actualmente uno de los principales problemas operacionales.⁸ La base para el estudio de las bacterias filamentosas causantes del bulking fue propuesta por Eikelboom y Van Buijsen, 1985, en la publicación "Microscopic sludge investigation manual",⁹ donde se documentan las técnicas y procedimientos claves para el estudio de bacterias filamentosas en los lodos activados y los morfotipos filamentosos, algunos denominados alfanuméricamente debido a la dificultad para aislarlos e identificarlos; no obstante gracias a los avances en la biología molecular, actualmente ha sido posible determinar el género, e incluso, la especie de varios morfotipos presentados por estos autores.¹⁰

Los microorganismos filamentosos comúnmente asociados a la aparición de bulking en las PTAR son: *Beggiatoa* spp., *Nocardia* spp., *Microthrix parvicella*, *Nostocoida limicola* I, II y III, *Sphaerotilus natans*, *Thiothrix* I y II, Tipo 021N, Tipo 0041, Tipo 1863, Tipo 0211, Tipo 1851, *Haliscomenobacter hydrophila*.^{7,11,12} No obstante, el conocimiento cinético y fisiológico de las bacterias filamentosas no es profundo debido a las limitaciones técnicas existentes para aislarlas, haciendo que la descripción de su crecimiento sea esencialmente mecanicista⁸ y el control del fenómeno de bulking sea parcial y a corto plazo.

Algunos autores^{1,5,13,14} han descrito ciertos parámetros que estimulan el crecimiento de las bacterias filamentosas, entre ellos se encuentran: la baja relación sustrato/microorganismo (F/M)*, (*F/M. Se mide como kilogramo de demanda Bioquímica de Oxígeno por kilogramo de Sólidos Suspendidos Volátiles del licor mixto por día (kgDBO₅/kgSSTLM•d), las bajas temperaturas, por ejemplo en la época de invierno; la baja concentración de oxígeno disuelto (OD), la cual es una de las causas más comunes de bulking filamentosos; la deficiencia de nutrientes (nitrógeno y fósforo), el pH bajo, la composición del agua residual (altas/bajas cargas de materia orgánica, concentraciones altas en grasa y aceites), tiempo prolongado de retención celular (THS) y de retención hidráulica (THR) y el tipo de agua a tratar (industrial o doméstica); sin embargo, el impacto de estos parámetros es probable que varíe según el tamaño de planta de tratamiento.

Para determinar la presencia de condiciones de bulking filamentosos se ha usado como método estándar la cuantificación del índice volumétrico de lodos

(IVL) que determina la sedimentabilidad del lodo, cuyo valor bajo condiciones normales se encuentra en el rango de 50-150 mL/g¹ y el índice de filamentos (IF) el cual es un índice cualitativo que evalúa la presencia de bacterias filamentosas en una escala de 0-5. Valores de IVL superiores a 150 mL/g e IF mayor a 3 están asociados con la aparición del bulking.¹⁰

Las técnicas de microscopía implementadas para el estudio de las bacterias filamentosas en los lodos activados son las más frecuentes debido a su fácil ejecución y bajo costo, entre ellas se destacan el conteo de filamentos en fresco, la observación de muestras coloreadas con tinción de Gram, Neisser y Sudán; no obstante existen técnicas moleculares que permiten cuantificar y medir los filamentos de forma más exacta como el método de hibridación fluorescente *in situ* (FISH),¹⁵ el cual genera mayor confianza frente a la subjetividad de las técnicas microscópicas. Otra técnica útil para el estudio de las bacterias filamentosas es la electroforesis en gel por gradiente de degradación (DGGE), la cual permite conocer la diversidad de bacterias en una muestra de lodo, pero su limitación está en la discriminación de filamentos importantes debido a la baja abundancia relativa de los mismos.¹⁶ Ambas metodologías son válidas y se complementan, por lo tanto, mientras sea posible es recomendable implementarlas simultáneamente.

Dentro de este fenómeno biológico, cabe destacar la importancia de conocer las variaciones poblacionales de las bacterias filamentosas, lo cual permite establecer correlaciones entre éstas y las condiciones de operación para mantener y mejorar la eficiencia de las PTAR. Muchos son los trabajos e investigaciones que se han hecho en este campo, no obstante en Colombia y en general en los países suramericanos existen pocos estudios que se ocupen del tema en contraste con el auge de los sistemas de tratamientos de aguas residuales. Esta revisión tiene como objetivo describir los parámetros físico-químicos que condicionan la proliferación de morfotipos bacterianos en el fenómeno de bulking filamentosos, mediante el análisis comparativo de diversos estudios a nivel mundial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se definió la pregunta de investigación: ¿Cuáles son los parámetros físico-químicos asociados a la prolifera-

ción de bacterias filamentosas (Bulking filamentosos) en las plantas de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados? A partir de ésta pregunta se hizo una revisión sistemática con artículos de investigación originales publicados en las bases de datos multidisciplinarias y específicas de áreas de ciencias exactas, contenidas en las colecciones electrónicas del Sistema de bibliotecas de la Universidad de Antioquia: Science Direct, Scielo, Web of Knowledge, EBSCO, Wiley, y Springer Link, empleando los términos: “tratamiento de aguas residuales”, “lodos activados”, “bulking”, “bacterias filamentosas”, y sus equivalentes en inglés y portugués, restringiendo la búsqueda a investigaciones publicadas los últimos 18 años; además, se revisaron las referencias de los artículos seleccionados para identificar otras que no se encontraran en las bases de datos. Se obtuvieron 160 artículos de investigación que contenían algún descriptor de búsqueda en el texto; de este primer filtro fueron seleccionados 47 artículos que tenían alguna relación con el bulking filamentosos. Esta selección la realizaron de forma independiente tres investigadores para valorar la reproducibilidad de la búsqueda. Finalmente aplicando los criterios de inclusión y exclusión que se describen a continuación, se eligieron 15 artículos que respondían la pregunta de investigación:

CRITERIOS DE INCLUSIÓN

1. Artículos originales que estimaran la relación entre las bacterias filamentosas y la aparición del bulking filamentosos.
2. Investigaciones que contengan información sobre la identificación de bacterias filamentosas, ya sea por técnicas moleculares o técnicas de microscopía.
3. Tipo de agua residual tratada por la planta.
4. Que las investigaciones relacionaran la presencia de bacterias filamentosas principalmente con los siguientes parámetros fisicoquímicos: relación F/M, OD, temperatura, pH y nutrientes.

CRITERIOS DE EXCLUSIÓN

1. Que las investigaciones estudiaran el fenómeno únicamente desde el punto de vista fisicoquímico y/o microbiológico.

Los artículos fueron agrupados de acuerdo a las bases de datos de origen en formato PDF, luego se realizó

una puesta en común sobre los resultados encontrados, se organizaron en una base de datos de Microsoft Excel® con el nombre de la revista, volumen, año y autor.

RESULTADOS

Inicialmente se encontraron 47 artículos relacionados con el bulking filamentosos en el proceso de lodos activados, los cuales incluían los términos de búsqueda en el título o en el resumen y pasaron por un filtro teniendo en cuenta los criterios de inclusión y exclusión. A partir de la revisión, 31 artículos fueron descartados de la siguiente manera: nueve artículos no especificaban los parámetros que afectaban el crecimiento de los microorganismos encontrados, once artículos únicamente se centraban en la identificación de bacterias filamentosas, tres artículos presentaban estudios cinéticos (modelación del crecimiento) no realizados en plantas de tratamiento piloto, cuatro correspondían a revisiones sistemáticas y cuatro artículos no asociaban los parámetros fisicoquímicos con la proliferación de éstas bacterias.

En total se escogieron 15 artículos que tenían en común el estudio de la relación de algunos parámetros fisicoquímicos con la proliferación de las bacterias causantes del bulking filamentosos. Los artículos fueron clasificados de acuerdo al tamaño de la PTAR: a escala industrial y plantas piloto (Tablas 1 y 2).

De los 15 artículos seleccionados, ocho investigaciones fueron realizadas en plantas de tratamiento de aguas residuales a escala industrial, ocho a nivel de plantas piloto (una de las investigaciones fue realizada tanto en planta piloto como industrial); el tipo de agua tratada varió en todos los estudios, tres investigaciones trataron aguas de origen industrial, de la industria de lácteos, industria de panadería, producción de papel y confitería, cuatro investigaciones trataron aguas de tipo doméstico, seis investigaciones utilizaron aguas mixtas (industrial y doméstica) y dos estudios se realizaron con aguas sintéticas.

Las investigaciones objeto de esta revisión fueron realizadas en México, en Francia, en China, en el Reino Unido, en Estados Unidos, Irán, Portugal, República Checa, Dinamarca e Italia (Figura 1), pertenecientes a la zona templada del norte, con un clima de estaciones y temperaturas que varían a lo largo del año. Sin embargo, según estos hallazgos, se observa

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos que influyen en la proliferación de bacterias filamentosas responsables del bulking en plantas de tratamiento de aguas residuales a escala piloto.

Estudio	Lugar	Tipo de agua residual	Parámetros causantes de bulking	Bacterias filamentosas	Bacterias dominantes	Técnica de identificación
Influence of transient substrate overloads on the proliferation of filamentous bacterial populations in an activated sludge pilot plant. <i>PERNELLE et al, 2001.</i>	Francia.	Doméstica.	<ul style="list-style-type: none"> Bajo OD. Sustrato fácilmente asimilable. 	<i>H. hydrossis, N. limicola II y III, Thiothrix spp., Tipo 021N, Tipo 0041, Tipo 0092, M. parvicella, Nocardia, S. natans.</i>	<i>H. hydrossis, N. limicola tipo II y III.</i>	Microscopía de contraste de fases y FISH ^a .
Low dissolved oxygen sludge bulking in sequencing Batch reactors. <i>HASHEMI et al, 2005.</i>	Irán.	Sintética: leche en polvo de confitería y agua del grifo.	<ul style="list-style-type: none"> Bajo OD. Procesos de nitrificación y desnitrificación. 	<i>M. parvicella.</i>	<i>M. parvicella.</i>	Microscopía (No específica).
Relationship of Species-Specific Filament Levels to Filamentous Bulking in Activated sludge. <i>LIAO et al, 2004.</i>	E.U.	Mixta.	<ul style="list-style-type: none"> Baja concentración de sustrato. Baja F/M. 	<i>Tipo 1851, S. natans, L. mucorales.</i>	<i>Tipo 1851, S. natans, L. mucorales.</i>	Microscopía de fluorescencia y FISH ^a .
Multiple approaches to assess filamentous bacterial growth. In activated sludge under different carbon source conditions. <i>GULEZ et al, 2008.</i>	E.U.	Sintética.	Fuentes de carbono fácilmente biodegradables: glucosa, acetato y sacarosa.	<i>S. natans, Thiothrix spp., N. limicola, T. nivea.</i>	<i>S. natans, N. limicola, T. nivea</i>	Microscopía de campo claro, DGGEB y FISH ^a .
Problems Caused by Filamentous Bacteria in Pilot-Scale Nutrient-Removal Activated-Sludge Plants. <i>BAXTER-PLANT et al, 1999.</i>	Reino Unido.	Mixta.	<ul style="list-style-type: none"> Contenido de ácido úrico en los polímeros extracelulares. Acetato. 	<i>M. parvicella.</i>	<i>M. parvicella.</i>	Microscopía de campo claro.
Identifying different types of bulking in an activated sludge system through quantitative image analysis. <i>MESQUITA et al, 2011.</i>	Portugal.	Doméstica enriquecida.	Baja F/M (0,38 kg kgDBO/kgSSTM*d).	<i>Thiothrix spp.</i>	<i>Thiothrix spp.</i>	Microscopía de campo claro y de epifluorescencia.
Stable limited filamentous bulking through keeping the competition between floc-formers and filaments in balance. <i>GUO et al, 2012.</i>	China.	Doméstica.	<ul style="list-style-type: none"> Bajo OD (<0,6 mg/L). Baja temperatura (<15°C). Mezcla completa. Acetato. 	<i>Tipo 021 N. (Thiothrix), S. natans, Tipo 0041, M. parvicella, Beggiatoa, N. limicola.</i>	<i>Tipo 021N (Thiothrix), S. natans.</i>	Microscopía de epifluorescencia y FISH ^a .
Impact of the repetition of oxygen deficiencies on the filamentous bacteria proliferation in activated sludge. <i>GAVAL et al, 2003.</i>	Francia.	Doméstica.	Largos periodos anaerobios (formación de compuestos de bajo peso molecular o compuestos reducidos de azufre).	<i>S. natans, Thiothrix II, M. parvicella, N. limicola II, N. limicola III, Tipo 021N, Tipo 0092, Tipo 0675, Tipo 0041.</i>	<i>H. hydrossis, Thiothrix sp. Tipo 021N, S. natans.</i>	Microscopía de epifluorescencia y FISH ^a .

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos que influyen en la proliferación de bacterias filamentosas responsables del bulking en plantas de tratamiento de aguas residuales a escala industrial.

Estudio	Lugar	Tipo de agua residual	Parámetros causantes de bulking	Bacterias filamentosas encontradas	Bacterias filamentosas dominancia	Técnica de identificación
Control del crecimiento de microorganismos filamentosos en una planta de tratamiento de aguas residuales industriales. <i>PACHECO et al, 2003.</i>	México.	Industrial (producción de levadura, panificación y frituras de maíz).	<ul style="list-style-type: none"> Baja temperatura (<12°C). Baja DBO5 (<0,1 kg/kg-d). Bajo DO (0,5 a 1,2 mg/L). 	<i>Thiothrix l y ll, N. limicola ll, Tipo 021N, Tipo 1863, Tipo 0041, Tipo 0211, Tipo 0701, Tipo 1863, Gallionella, M. parvicella.</i>	<i>M. parvicella, Thiothrix ll.</i>	Microscopía (No específica).
Relationship of Species-Specific Filament Levels to Filamentous Bulking in Activated Sludge. <i>LAO et al, 2004.</i>	E.U.	Mixta.	<ul style="list-style-type: none"> Baja concentración de sustrato. Baja F/M. 	<i>Tipo 1851, S. natans, L. mucorales.</i>	<i>Tipo 1851, S. natans, L. mucorales.</i>	Microscopía de fluorescencia y FISH ^a .
Bulking and Foaming in France: The 1999-2001 survey. <i>GRAVELEAU et al, 2005.</i>	Francia.	Mixta.	<ul style="list-style-type: none"> Baja temperatura (invierno y otoño). Baja F/M. Alta edad de lodo. 	<i>Tipo 0092, M. parvicella, Thiothrix spp.</i>	<i>Tipo 0092, M. parvicella, Thiothrix spp.</i>	Microscopía de contraste de fase, microscopía láser confocal y FISH ^a .
Experience of bulking in the UK. N. <i>HORAN et al, 2004.</i>	Reino Unido.	Mixta.	<ul style="list-style-type: none"> Baja F/M (0,005 hasta 0,20 kgDBO/kgSSTLM*d). Larga edad de lodo. Bajas temperaturas (<15°C). Bajo OD. 	Aguas industriales, Tipo 021N, N. limicola, Thiothrix, Tipo 0041, H. hydrossis, Tipo 1701, Tipo 1883, Tipo 0914. Aguas municipales, M. parvicella, Tipo 021N, N. limicola, S. natans, Nocardia, H. hydrossis, Thiothrix, Beggiatoa. Tipo 1863.	Aguas Industriales, Tipo 021N, N. limicola, Thiothrix. Aguas municipales, M. parvicella, Tipo 021N, N. limicola.	Microscopía (No específica).

Continúa en la próxima página.

Continuación de la Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos que influyen en la proliferación de bacterias filamentosas responsables del bulking en plantas de tratamiento de aguas residuales a escala industrial.

Estudio	Lugar	Tipo de agua residual	Parámetros causantes de bulking	Bacterias filamentosas encontradas	Bacterias filamentosas dominancia	Técnica de identificación
A novel technology for bulking control in biological wastewater treatment plant for pulp and paper making industry. TSANG <i>et al</i> , 2006.	China.	Industrial.	Baja F/M.	<i>Nocardia amararae</i> .	<i>Nocardia amararae</i> .	Microscopía (No específica).
Screening of Filamentous Microorganisms in Activated Sludge Plants. KRHU-TKOVÁ <i>et al</i> , 2005.	República Checa.	Industrial.	Alta contaminación orgánica.	<i>M. parvicella</i> , Tipo 0041, Tipo 0675, Tipo 0092, Tipo 1851, Tipo 021N, <i>N. limicola</i> , <i>H. hydrossis</i> , Tipo 0803, <i>S. natans</i> , <i>Thiothrix</i> spp.	<i>M. parvicella</i> , Tipo 0092, Tipo 0041, Tipo 0675, Tipo 1851, <i>N. limicola</i> .	Microscopía (No específica).
Population dynamics of filamentous bacteria in Danish wastewater treatment plants with nutrient removal, MIELCZAREK <i>et al</i> , 2012.	Dinamarca.	Mixta.	<ul style="list-style-type: none"> Baja temperatura (invierno). Tipo de sustrato en el agua residual. 	<i>M. parvicella</i> , Tipo 0041, Tipo 0675, Tipo 1851, Tipo 1701, Tipo 0092, Tipo 0803, <i>Thiothrix</i> , Tipo 021N, <i>H. hydrossis</i> , <i>N. limicola</i> , <i>Mycolata</i> .	<i>M. parvicella</i> , Tipo 0041, Tipo 0675.	Microscopía de campo claro, de epifluorescencia y FISH ^a .
Survey of filamentous microorganisms from bulking and foaming activated-sludge plants in Italy, MADONI <i>et al</i> , 2000.	Italia.	Mixta.	<ul style="list-style-type: none"> Alta F/M (>0,2 kgDBO/kgSSTM-d). Tamaño de la planta: grande y mediano. Bajo OD. Alta concentración de amonio. 	<i>M. parvicella</i> , Tipo 0041, Tipo 021N, Tipo 0092, Tipo 0675, Tipo 0581, Tipo 1701, <i>Thiothrix</i> , <i>N. limicola</i> .	SBR: <i>M. parvicella</i> , Tipo 0092. Plantas convencionales <i>N. limicola</i> , Tipo 1701.	Microscopía de contraste de fases.

^aFISH: Hibridación fluorescente *in situ*.

^bDGGE: Electroforesis en gel con gradiente de desnaturalización.

^cSBR: Sistema convencional y biológico de remoción de nutrientes

que son insuficientes los estudios realizados en África y Suramérica, correspondientes a la zona tropical con temperaturas más estables.

En general, las PTAR a escala industrial mostraron mayor diversidad de morfotipos respecto a los que se presentaron en las PTAR a escala piloto (Tabla 1). Se encontró que en las PTAR a escala industrial el microorganismo que aparece con mayor frecuencia es *Microthrix parvicella*, seguido del morfotipo 0092, *N. limicola*, tipo 1851 y tipo 0041; vale la pena anotar que esta frecuencia no obedece a dominancia de los morfotipos en el sistema, sino más bien al número de veces que se repite en este tipo de plantas; parece haber una asociación de estos morfotipos con bajas concentraciones de oxígeno disuelto, baja relación F/M y bajas temperaturas.^{7,15,17,18} Para el caso de las investigaciones llevadas a cabo en plantas piloto se encontró que el microorganismo más frecuente es *Sphaerotilus natans*, seguido de *M. parvicella*, *N. limicola*, *H. hydrossis*, *Thiothrix* sp., y tipo 021N, la proliferación de éstos está relacionada especialmente con la baja relación F/M, baja concentración de OD y con la presencia de sustratos fácilmente biodegradables en el afluente.^{4,6,15,16,19}

La mayoría de estudios utilizaron técnicas de microscopía para la identificación de las bacterias fila-

mentosas, siguiendo el sistema establecido por Eikelboom y Van Buijsen⁹. Las técnicas microscópicas prevalecen por su accesibilidad y fácil ejecución, y en algunos casos pueden generar más precisión como ocurrió en el estudio de Liao y Cols, 2004, donde al realizar una comparación de la medición manual de la longitud del filamento y medición automatizada con un software de análisis de imagen, se halló que la medición manual es más precisa y exacta, debido a que los filamentos existen parcialmente dentro y fuera del floc, por lo tanto el software no podía distinguir entre los filamentos en ambos casos.¹⁵

No se pudo realizar una comparación debido a la falta de reciprocidad de condiciones de las PTAR y las diferencias entre las zonas donde se realizaron los estudios. No se determinó ninguna relación entre el tipo de agua y la predominancia de morfotipos en las investigaciones de planta piloto, aunque a nivel industrial hubo mayor correlación entre la aparición de ciertos morfotipos con algunos parámetros fisicoquímicos (baja relación F/M, bajo OD y baja temperatura) según el tipo de agua.

En la mayoría de las investigaciones no se establecieron valores puntuales de los parámetros fisico-

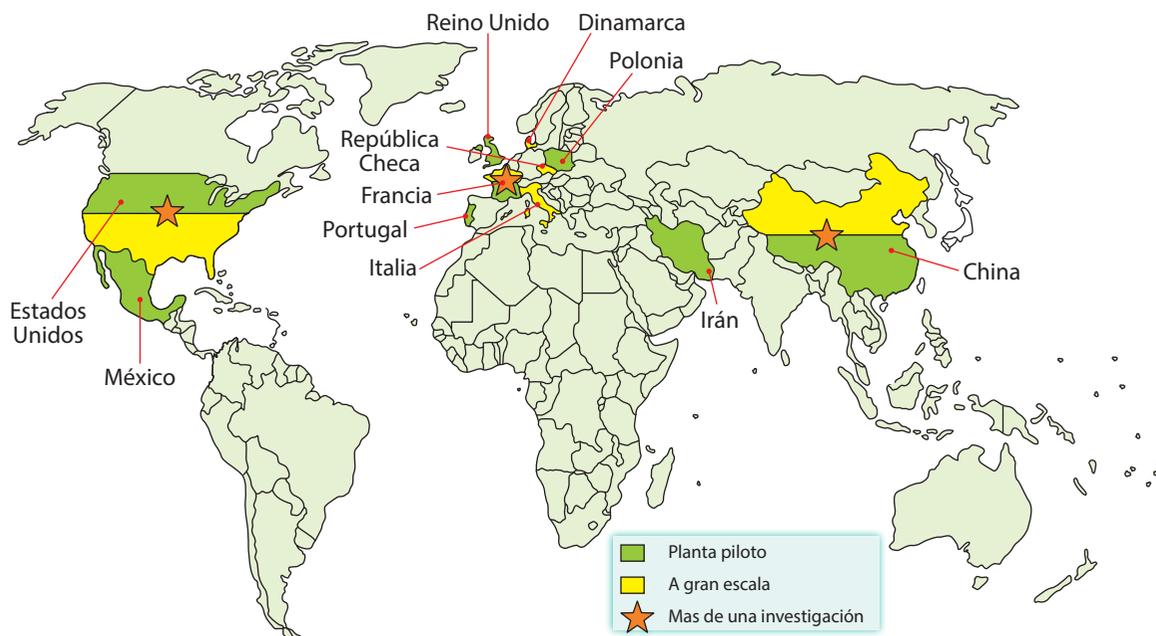


Figura 1. Regiones en donde se fueron llevadas a cabo las investigaciones incluidas en la revisión sistemática

químicos causantes del bulking, asunto que también limitó la posibilidad de hacer alguna comparación entre las PTAR. Las características y los resultados obtenidos en cada estudio, tales como los parámetros más significativos en la proliferación de los microorganismos causantes del bulking filamentoso, se observan con mayor claridad en las Tablas 1 y 2.

DISCUSIÓN

En esta revisión se encontró que los parámetros físico-químicos con mayor frecuencia involucrados en la proliferación de bacterias filamentosas que provocan el bulking filamentoso en los sistemas de lodos activados de las PTAR son: la baja concentración de oxígeno disuelto (OD), baja relación sustrato/microorganismo (F/M), la baja temperatura y la alta disponibilidad de fuentes de carbono fácilmente biodegradables,^{6,11,16,18} la composición del agua o el sustrato fue otro factor importante en la aparición de bulking.¹¹ Por otro lado, los parámetros indicadores de la presencia de bulking, el índice de filamentos (IF) y el índice volumétrico de lodos (IVL), fueron implementados usualmente para determinar condiciones de bulking en las plantas, prefiriéndolos sobre las técnicas moleculares como FISH y DGGE.^{8,16,19} En las PTAR el IVL es el indicador determinante de la presencia de bulking con un valor límite de 150 mL/g, no obstante el diseño de las PTAR en países como Francia, por ejemplo, permite valores hasta de 200 mL/g, siendo este el valor considerado en ese país, como el umbral más allá del cual un tanque de sedimentación no puede garantizar la adecuada separación de lodos.¹⁸

La baja concentración de OD fue uno de los parámetros con mayor influencia en la proliferación de bacterias filamentosas, lo cual puede explicarse debido a que este grupo de microorganismos posee mayor superficie/volumen que las bacterias formadoras de floc, proporcionándoles una ventaja en la obtención de oxígeno disponible. Un lodo activado en condiciones normales generalmente tiene un OD igual o mayor a 2 mg/L, niveles que permiten controlar la proliferación de estas bacterias.¹ Ante la ausencia de un valor exacto de OD que propicie la proliferación de bacterias filamentosas, algunos autores proponen en sus investigaciones que un valor menor a 1,2 mg/L es suficiente para la aparición del fenómeno.^{4,7}

Se encontró que el otoño y el invierno en las zonas templadas, constituye un factor crítico para las PTAR, principalmente debido al cambio de temperatura. La disminución de la temperatura es un parámetro que provoca la proliferación de las bacterias filamentosas cuando ocurre de manera intempestiva, tal como lo demuestra la investigación de *Guo y Cols, 2012*, donde al disminuir la temperatura de 21,5°C hasta 15°C el IVL aumentó de 178 mL/g a 394 mL/g, evento asociado igualmente con el incremento en la densidad de *M. parvicella*.⁴ En invierno, los flóculos tienden a ser menos compactos, se tornan irregulares y difusos, así como también aumenta la producción de polisacáridos extracelulares que afectan negativamente la sedimentación.^{4,11} Cabe destacar la falta de investigación, publicaciones y registros en las zonas tropicales donde la temperatura es más estable a lo largo del año.

En condiciones normales la relación F/M en las PTAR es de aproximadamente 0,5 kgDBO/kgSSTLM•d para que haya un equilibrio en la microbiota del sistema,¹ cuando esta relación disminuye a valores entre 0,005 a 0,20 kg DBO/kg MLSS•día,^{15,17,20} se considera que puede ocurrir bulking, básicamente debido a que las bacterias filamentosas tienen una mayor relación superficie – volumen que les permite captar el alimento más fácilmente que las bacterias formadoras de floc. Este parámetro, a su vez se relaciona con el aumento de la edad del lodo y por ende con el mayor tiempo de residencia de los microorganismos en el sistema,^{1,17,18} que aumenta la probabilidad de que se produzca este fenómeno.

Un resultado inesperado se obtuvo a partir de dos artículos *Madoni y Cols, 2000*²¹ y *Pacheco y Cols, 2002*,⁴ en donde se encontró que los altos rangos en la relación F/M son responsables del bulking filamentoso. Estos dos autores encontraron que cuando la relación F/M es mayor a 0,2 kgDBO/kgSSTLM•d, aumentó la frecuencia de problemas de bulking. *Pacheco y Cols, 2002*⁷ proponen que estos dos casos son posibles ya que a baja relación F/M la decantación desmejora y los flóculos se vuelven dispersos, debido a que se presenta un proceso de respiración endógena, se generan residuos de cápsulas celulares ligeras resistentes a la sedimentación y en consecuencia se produce bulking, no obstante con alta relación F/M entre 0,6 y 1,0 kgDBO/kgSSTLM•d predominaron microorganismos de naturaleza filamentosa que provocan esponjamiento del lodo, impidiendo la sedimentación

al permanecer en suspensión.⁷ Varios autores^{4,6,8} concuerdan que los parámetros OD y la relación F/M están relacionados; y en conjunto, pueden provocar la propagación de las bacterias filamentosas cuando coinciden en valores bajos.

La presencia de fuentes de carbono fácilmente asimilables en el afluente fue un parámetro que no se había contemplado en el planteamiento de la revisión, debido a sus escasos antecedentes, sin embargo, se encontró que cuatro plantas de tratamiento a escala piloto que utilizaron glucosa, acetato, propionato, piruvato como fuentes de carbono en su experimentación, están asociados con la proliferación de las bacterias filamentosas; así mismo estos sustratos combinados con bajas concentraciones de OD posibilitaron en mayor proporción la aparición del fenómeno.^{4,6,16,19}

Al clasificar los estudios según el tamaño de la planta, se encontró que éste puede generar divergencias en la incidencia de algunos parámetros fisicoquímicos sobre el fenómeno de bulking, particularmente teniendo en cuenta que a menor volumen de agua a tratar es más factible el control de los mismos. En la mayoría de PTAR a escala piloto,^{6,8,15,16} hubo mayor frecuencia de las bacterias filamentosas *M. parvicella*, *S. natans*, *Thiothrix* spp., *N. limicola*, *H. hydrossis* y tipo 021N; siendo el más frecuente *S. natans*. Dentro de las PTAR a escala industrial, el morfotipo más frecuente fue *M. parvicella*, seguido del tipo 0092, *N. limicola*, tipo 1851 y tipo 0041, se resalta el hecho de que no se encontró un ordenamiento de los morfotipos en términos de su dominancia, más bien obedece a una conveniencia de los investigadores.

Dentro de las investigaciones se encontró que algunos autores indagaron sobre la asociación de algunos parámetros fisicoquímicos con la proliferación de ciertos morfotipos. *Hashemi y Cols, 2005* y *Baxter-plant y Cols, 1999* estudiaron a *M. parvicella*; *Mesquita y Cols, 2011* estudiaron a *Thiothrix* spp., por su parte *Tsang y Cols, 2006* estudiaron a *N. amarae*.

Tal como se estableció en esta revisión *M. parvicella* es el morfotipo más frecuente en las PTAR a escala industrial, en este sentido se pudo compilar información importante donde se relaciona su proliferación con parámetros definidos; este morfotipo se ve estimulado por procesos de desnitrificación, donde hay presencia simultánea de zonas anóxicas y aerobias¹⁷ y se presenta generalmente en las etapas de recirculación de las PTAR.^{6,16} *M. parvicella* prolifera en PTAR

mixtas e industriales y en afluentes con compuestos como el acetato y el ácido urónico.¹⁹ Las bajas temperaturas (<15°C) y su disminución drástica pueden provocar su incremento, así como el bajo OD.^{4,7,8,17} Se observó que en varios estudios aparecían conjuntamente *M. parvicella*, *Thiothrix* spp., y el tipo 0092, en relación con este hallazgo *Gravelean y Cols, 2005* encontraron que en el 40% de sus observaciones *M. parvicella* estaba asociado al tipo 0092 y en el 15% estuvo asociado a *Thiothrix* spp.¹⁸

Otra bacteria significativa en varios estudios fue *S. natans*, la cual se encontró como la más frecuente en PTAR a escala piloto,²² esta bacteria es afín a sustratos fáciles de asimilar como glucosa, acetato, propionato y piruvato,^{4,6,16} generalmente se presenta en aguas residuales de tipo doméstico y mixtas,^{4,15,22} así mismo concentraciones bajas de oxígeno disuelto (<0,6 mg/L) y periodos anaerobios estimulan su crecimiento.^{4,6,22} A pesar de que en algunas investigaciones se halló que la baja temperatura⁴ y la baja relación F/M¹⁵ provocan su proliferación, parecen ser factores que no favorecen su desarrollo significativamente, ya que no fueron las causas más frecuentes descritas en todos los estudios. Este morfotipo se presentó con mayor frecuencia en E.U. y Francia. Además se observó que podría haber una asociación entre *Thiothrix* spp., y el tipo 021N.^{4,16,22}

Thiothrix spp., es otro morfotipo frecuente en general en ambos tamaños de PTAR, su crecimiento es estimulado por los largos periodos anaeróbicos en los que se da la formación de compuestos reducidos de azufre,²² concentraciones de OD menores a 0,6 mg/L,^{4,22} relación F/M baja (0,38 kgDBO/kgSSTLM•d)⁵ y bajas temperaturas.^{7,17,18} La presencia de propionato y piruvato en el afluente puede causar su incremento. Actualmente se conoce que el morfotipo 021N de Eikelboom pertenece al género *Thiothrix*.¹⁶

A pesar de que en general los autores no se comprometen con valores de los parámetros fisicoquímicos y su incidencia en la aparición del bulking, *Tsang y Cols, 2006* asociaron la presencia de *N. amarae*, una bacteria filamentosas poco común entre los morfotipos encontrados, con baja relación F/M 0,2-0,5 kg DBO/SSTLM•d,²⁰ en aguas residuales de la industria del papel. Por su parte *N. limicola* prolifera en sustratos de fácil degradación como glucosa, etanol y metanol¹⁶ y es estimulado por una baja relación F/M entre 0,1-0,3 kgDBO/kgSSTLM•d.¹⁷ En consecuencia, se

puede concluir que no es posible establecer un valor o rango general de valores para cada uno de los parámetros que influyen la proliferación de las bacterias filamentosas de manera general, ya que algunos morfotipos tienen mayor o menor tolerancia que otros.

Finalmente, respecto a la composición del agua, que es uno de los factores de mayor relevancia, pues de éste depende la carga orgánica que entra al sistema y la posibilidad de evaluar el efecto de la presencia de ciertas sustancias, se encontró que las plantas de tratamiento que se ocupan de efluentes industriales son aún más sensibles a problemas de bulking, principalmente por el desequilibrio en la composición de carbono, nitrógeno y fósforo.¹¹

CONCLUSIONES

- Esta revisión demuestra que la proliferación de bacterias filamentosas en lodos activados puede depender de muchos factores como la entrada masiva de sustrato fácilmente asimilable, la disponibilidad de oxígeno disuelto por unidad de carga orgánica DO/(F/M), y las bajas temperaturas.
- La excesiva proliferación de bacterias filamentosas incide directamente sobre las características de los flóculos, produciendo cambios importantes en su estructura, tamaño, compactación y resistencia.
- El tamaño de la planta no mostró diferencias en los parámetros identificados como causantes de la proliferación de bacterias filamentosas pero si en la dominancia de ciertos morfotipos. Se observa que para las plantas piloto el microorganismo más frecuente fue *S. natans* y para las plantas a escala industrial fue *M. parvicella*. Este último reconocido como uno de los principales causantes de los fenómenos de bulking en la mayoría de las plantas.
- Dentro de las investigaciones se destacó la asociación en el crecimiento simultáneo entre morfotipos como *S. natans* con *Thiothrix* spp., y el tipo 021N; la misma situación ocurrió entre *M. parvicella* con el tipo 0092 y *Thiothrix* spp.
- La mayoría de los resultados relacionan únicamente a los morfotipos dominantes con los parámetros fisicoquímicos causantes del bulking, no obstante, podrán existir otras bacterias cuya influencia puede ser clave para un mejor entendimiento de este fenómeno.

- Aún no se ha logrado un consenso sobre un valor exacto de los parámetros fisicoquímicos que se asocian a la proliferación de las bacterias filamentosas, de alguna manera los valores aquí planteados constituyen una guía para los operadores de las PTAR, en consecuencia cada planta podría eventualmente definir sus propias condiciones de operación.
- Los parámetros relacionados con la proliferación de bacterias filamentosas recopilados en esta revisión no presentaban como objeto de estudio las variables: tiempo de retención celular, tiempo de retención hidráulica y pH, los cuales pueden incidir en la aparición del fenómeno del bulking.
- Las investigaciones revisadas fueron realizadas en países ubicados en zonas templadas, dejando vacíos sobre el comportamiento de este fenómeno en zonas tropicales.

CONFLICTO DE INTERESES

Se declara que no existe conflicto de intereses o responsabilidades compartidas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Bitton G.** Microbiology of wastewater treatment. En: Bitton G. Wastewater microbiology. 3ª ed. New Jersey: John Wiley & Sons, INC; 2005. p. 211-395.
2. **Agridiotis V, Forster CF, Balavoine C, Wolter C, Carliell-Marquet C.** An examination of the surface characteristics of activated sludge in relation to bulking during the treatment of paper mill wastewater. Water Environ J. 2006; 20(3): 141-149.
3. **Donkin MJ.** Bulking in aerobic biological systems treating dairy processing wastewaters. Int J Dairy Technol. 1997; 50(2): 67-72.
4. **Guo J, Yongzhen P, Wang S, Yang X, Wang Z, Zhu A.** Stable limited filamentous bulking through keeping the competition between floc-formers and filaments in balance. Bioresour Technol. 2012; 103(1): 7-15.
5. **Mesquita DP, Amaral AL, Ferreira EC.** Identifying different types of bulking in an activated sludge system through quantitative image analysis. Chemosphere. 2011; 85(4): 643-652.
6. **Pernelle JJ, Gaval G, Cotteux E, Ducheá P.** Influence of transient substrate overloads on the proliferation

- of filamentous bacterial populations in an activated sludge pilot plant. *Wat. Res.* 2001; 35(1): 129-134.
7. **Pacheco V, Jáuregui B, Pavón T, Mejía G.** Control del crecimiento de microorganismos filamentosos en una planta de tratamiento de aguas residuales industriales. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 2003; 19(1): 47-53.
 8. **Hashemi SH, Azimi AA, Torabian A, Nabi G, Mahmoodkhani R.** Low dissolved oxygen sludge bulking in sequencing batch reactors. *Int J Environ Stud.* 2005; 62(4): 415-420.
 9. **Eikelboom DH, Van Buijsen HJJ.** *Microscopic Sludge Investigation Manual.* 2ª ed. Netherlands: TNO; 1981.
 10. **Eikelboom Dick H.** *Process control of activated sludge plants by microscopic investigation.* 1ª ed. UK: IWA publishing; 2000.
 11. **Mielczarek AT, Kragelund C, Eriksen PS, Nielsen PH.** Population dynamics of filamentous bacteria in Danish wastewater treatment plants with nutrient removal. *Water Res.* 2012; 46(12): 3781-3795.
 12. **Kragelund C, Levantesi C, Borger A.** Identity, abundance and ecophysiology of filamentous bacteria belonging to the Bacteroidetes present in activated sludge plants. *Microbiology.* 2008; 154(3): 886-894.
 13. **Martins AMP.** Bulking sludge control: kinetics, substrate storage, and process design aspects. *Wat Res.* 2004; 38(4): 793-817.
 14. **Richard M, Sear-Brown, Collins F.** *Activated sludge microbiology problems and their control [Monografía en línea].* Nueva York: Presented at the 20th annual Usepa national operator trainers conference; 2003 [Acceso 20 de Marzo de 2013] Disponible en: http://www.dec.ny.gov/docs/water_pdf/drrichard1.pdf
 15. **Liao J, Lou I, de los Reyes III FL.** Relationship of Species-Specific Filament Levels to Filamentous Bulking in Activated Sludge. *Appl Environ Microbiol.* 2004; 70(4): 2420-2428.
 16. **Gulez G, de los Reyes III FL.** Multiple approaches to assess filamentous bacterial growth in activated sludge under different carbon source Conditions. *J Appl Microbiol.* 2008; 106(2): 682-691.
 17. **Horan N, Lavender P, Cowley E.** Experience of activated-sludge bulking in the UK. *Water Environ J.* 2004; 18(3): 177-182.
 18. **Graveleau L, Cotteux E, Duchène P.** Bulking and Foaming in France: The 1999-2001 survey. *Acta hydrochim hydrobiol.* 2005; 33(3): 223-231.
 19. **Baxter-Plant VS, Hayes E, Forster CF.** Problems Caused by Filamentous Bacteria in Pilot-Scale Nutrient-Removal Activated-Sludge Plants. *Water Environ J.* 1999; 13(2): 131-136.
 20. **Tsang YF, Chua H, Sin SN, Tam CY.** A novel technology for bulking control in biological wastewater treatment plant for pulp and paper making industry. *Biochem Eng J.* 2006; 32(3): 127-134.
 21. **Madoni P, Davoli D, Gibin G.** Survey of filamentous microorganisms from bulking and foaming activated-sludge plants in Italy. *Wat Res.* 2000; 34(6): 1767-1772.
 22. **Gaval G, Pernelle JJ.** Impact of the repetition of oxygen deficiencies on the filamentous bacteria proliferation in activated sludge. *Wat Res.* 2003; 37(9): 1991-2000.
 23. **Krhutková O, Denisb Nicolas, Wanner Jirí.** Screening of Filamentous Microorganisms in Activated Sludge Plants. *Acta hydrochim hydrobiol.* 2005; 33(3): 270-274.
 24. **Flores-Alsina X, Comas J, Rodriguez-Roda I, Germaey KV, Rosen C.** Including the effects of filamentous bulking sludge during the simulation of wastewater treatment plants using a risk assessment model. *Wat Res.* 2009; 43(18): 4527-4538.