



FORMULACIÓN DE UN PROTOCOLO PARA EVALUAR EL POTENCIAL DE GRANULACIÓN (PGA) DE UN INÓCULO AEROBIO

Dayana Grisales Penagos, Mateo Villarraga Manrique, Jenny Rodríguez Victoria

**Universidad del Valle
Santiago de Cali, Colombia**

Resumen

La granulación aerobia es una novedosa e innovadora tecnología utilizada para el tratamiento de agua residual; su primer reporte corresponde a Morgenroth *et al.* (1997), desde entonces, ha conseguido atraer el interés de los investigadores debido a su capacidad para conservar dentro del sistema un considerable número de microorganismos, rápida sedimentación y notable eficiencia de remoción y/o bio adsorción de una amplia gama de contaminantes. Es por esto, que ha empezado a considerarse como una tecnología con favorable relación costo/beneficio, puesto que permite tratar grandes volúmenes de agua residual en reactores más compactos (Ivanov, 2006; Nancharaiah y Kiran, 2017; Sarma *et al.*, 2017; Sengar *et al.*, 2018).

Los gránulos aerobios son definidos como agrupaciones de microorganismos auto inmovilizados en esferas densas y compactas (Liu *et al.*, 2008; Nancharaiah y Kiran, 2017; Sarma *et al.*, 2017). Cada esfera de biomasa puede componerse de varias capas biológicas en función de la penetración de oxígeno, emulando diferentes microecosistemas (Khan *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2008; Nancharaiah y Kiran, 2017).

Cuando se realizan investigaciones relacionadas con granulación, un lodo no adaptado a las condiciones de su nuevo medio, puede acarrear largos periodos para obtener los primeros resultados, esto a su vez representa gastos de recursos económicos, físicos y temporales, especialmente si se desconoce la capacidad de la biomasa para desarrollarse como gránulos aerobios. Algunos autores han propuesto métodos de cultivo basados en conceptos y experiencia anteriores (Tay *et al.*, 2004b, Hailei *et al.*, 2006, de Sousa Rollemberg *et al.*, 2018); sin embargo, requieren de un uso considerable de recursos y su aplicabilidad se enfoca a sistemas de gran

envergadura, además de no ser lo suficientemente claras o sencillas para su implementación. Basados en esto y en la necesidad de encontrar alternativas asequibles para facilitar y promover el desarrollo tecnológico de la granulación aerobia, se planteó y desarrolló un protocolo que permite determinar el potencial de granulación aerobia (PGA). El protocolo comprende un conjunto de parámetros y consideraciones que interactúan entre sí, para crear un medio controlado que además de estimular el agrupamiento de la población celular, permite evaluar mediante pruebas sencillas de sedimentabilidad y parámetros morfológicos de bajo costo y complejidad, su capacidad para formar gránulos.

El protocolo PGA representa una herramienta de evaluación y toma de decisión, útil para diferentes escalas de aplicación. Su implementación es sencilla y relativamente económica, permitiendo obtener conocimientos de la posibilidad y capacidad de formación de gránulos aerobios de un lodo en un período significativamente menor en comparación con otros planteamientos reportados.

Palabras clave: granulación aerobia; protocolo; tratamiento de agua residual

Abstract

Aerobic granulation is a novel technology used for wastewater treatment, its first report was made by Morgenroth et al. (1997), thenceforth, it has managed to engage the interest from researchers due to its ability to preserve inside its own system a wide variety and large amount of microorganism, fast sedimentation y remarkable removal and / or bio-adsorption efficiency of a wide range of contaminants. For this reason, it's considered as a technology with a favorable cost / benefit ratio, since it allows treating large volumes of wastewater in more compact reactors (Ivanov, 2006; Nancharaiah y Kiran, 2017; Sarma et al., 2017; Sengar et al., 2018).

Aerobic granules are known as self-immobilized groups of microorganisms in dense and compact spheres (Liu et al., 2008; Nancharaiah y Kiran, 2017; Sarma et al., 2017). Each biomass sphere can be composed of several biological layers depending on the penetration of oxygen through its core, emulating different micro ecosystems (Khan et al., 2013; Liu et al., 2008; Nancharaiah y Kiran, 2017).

Aerobic granulation research using a not adapted sludge to its new environment can imply long periods to develop results, therefore it can add up to economic, physical and temporary resources, especially if the biomass capacity to develop as aerobic granule is unknown. Some authors have proposed cultivation methods based on previous concepts and experience. (Tay et al., 2004b, Hailei et al., 2006, de Sousa Rollemberg et al., 2018); however, they require a considerable use of resources and their applicability is focused on large-scale systems, in addition to not being clear or simple enough for their implementation. Based on this and the need to find affordable alternatives to facilitate and promote the technological development of aerobic granulation, a protocol was proposed and developed to determine the aerobic granulation potential (PGA).

The protocol comprises a set of parameters and considerations, to create a controlled environment that, in addition to stimulating the clustering of the cell population, allows to evaluate, by means of



simple sedimentability tests and low-cost and complex morphological parameters, its ability to form granules. Its implementation is simple and relatively inexpensive, allowing to obtain knowledge of the possibility and capacity of formation of aerobic granules of a sludge in a significantly shorter period compared to other reported approaches.

Keywords: *aerobic granulation; protocol; waste water treatment*

1. Introducción

Durante las últimas décadas, el interés por investigar la tecnología de biogranulación ha crecido constantemente debido a sus características únicas y aplicables en la degradación de diferentes tipos de agua residual. La biogranulación es un proceso de autoinmovilización microbiana influenciada por la interacción de sus propiedades biológicas, físicas y químicas (Liu, Y and Tay, J.H. (2004)). Está dividida en dos grupos generales, granulación anaerobia y aerobia. La granulación anaerobia ha sido ampliamente estudiada y reportada con éxito en el reactor de manto de lodo anaerobio de flujo ascendente (UASB) desde 1970, mientras que, la formación de lodo granular aerobio fue reportado hasta 1997 por el investigador Morgenroth.

La granulación aerobia es un novedoso y prometedor tratamiento de agua residual que ha conseguido atraer la atención de diversos autores por su capacidad de conservar dentro del sistema un considerable número de microorganismos, rápida sedimentación y notable eficiencia de remoción y/o bio adsorción de una amplia gama de contaminantes (Ivanov, 2006; Nancharaiah y Kiran, 2017; Sarma *et al.*, 2017; Sengar *et al.*, 2018).

Los gránulos aerobios son definidos como agregaciones de microorganismos en forma de esferas densas y compactas, su estructura interna puede estar diferenciada en capas biológicas que conforman microecosistemas en función de la penetración del oxígeno (Liu *et al.*, 2008; Khan *et al.*, 2013; Nancharaiah y Kiran, 2017; Sarma *et al.*, 2017). Este tipo de características le han atribuido algunas ventajas sobre los sistemas aerobios convencionales y representar una alternativa para superar los principales inconvenientes de baja densidad, lavado de biomasa, tiempo de retención hidráulico (TRH) prolongado, grandes áreas de trabajo y acumulación de lodos producidos usualmente en este tipo de tratamientos (Bello y Raman, 2017; Iskandar *et al.*, 2018). Conforme a lo mencionado por Sarma *et al.* (2017), una gran cantidad de agua residual puede ser tratada con esta tecnología dentro de una quinta parte del espacio ocupado por una planta de tratamiento convencional, pues el éxito del mismo es dado por la capacidad metabólica de los microorganismos y de la eficiente separación entre biomasa y efluente tratado.

Cuando se realizan investigaciones relacionadas con granulación, un lodo no adaptado a las condiciones de su nuevo medio, puede presentar largos periodos en el acople y la obtención de resultados, así como, la no transformación a biomasa granular, lo que, a su vez, representa gastos de recursos económicos, físicos y temporales, especialmente si se desconoce la capacidad del lodo para desarrollar gránulos aerobios. Algunos autores han propuesto configuraciones y procedimientos de cultivo basados en conceptos y experiencias anteriores (Hailei *et al.*, 2006, de Sousa Rollemberg *et al.*, 2018), también Tay *et al.* (2004) patentó un procedimiento para la



obtención de biomasa granular. No obstante, las metodologías formuladas hasta el momento, requieren de un uso considerable de recursos, su aplicabilidad se enfoca a sistemas de gran envergadura y/o no son lo suficientemente claras o sencillas para su implementación.

Basados en esto y en la necesidad de encontrar alternativas asequibles para facilitar y promover el desarrollo tecnológico de la granulación aerobia, se planteó el protocolo de granulación aerobia (PGA) como un conjunto de parámetros y consideraciones que producen tanto individual como grupalmente la estimulación sobre la biomasa al crear un medio controlado que permite evaluar la posibilidad de agrupamiento de la población celular mediante pruebas de sedimentabilidad y parámetros morfológicos sobre la biomasa de interés.

El protocolo PGA representa una herramienta de evaluación, útil para diferentes tamaños de aplicación. Su implementación es sencilla y relativamente económica, permitiendo obtener conocimientos de la posibilidad y capacidad de formación de gránulos aerobios de un lodo en un corto período.

2. Materiales y métodos

El protocolo para el potencial de granulación aerobia (PGA) fue establecido luego de realizar una considerable revisión de literatura, en donde se identificaron los principales parámetros operacionales y los valores más reiterativos, con esto se pudo determinar un patrón de comportamiento que fue fundamental en la elección de los rangos del protocolo y en las metodologías a realizar.

El PGA se desarrolló en tres fases: preparación del inóculo, puesta en marcha o aplicación del protocolo y validación de la biomasa obtenida. Durante todo el experimento se realizó seguimiento microscópico a las agregaciones celulares presentadas.

Preparación del inóculo

Se utilizó como inóculo un lodo proveniente del sistema de lodos activados de la planta de tratamiento de agua residual doméstica (PTARD) el Caney, ubicada en la ciudad de Santiago de Cali.

Con el fin de que los microorganismos asimilaran el nuevo sustrato y de preservar la mayor diversidad microbiana, el inóculo se sometió a un proceso de adaptación. Esta estrategia consistió en mezclar en una proporción 50-50 de volumen, el inóculo con el sustrato dentro de un recipiente cónico y aireado. Para determinar la asimilación del sustrato se realizaron mediciones periódicas de la DQO hasta alcanzar una remoción mayor del 40%.

Adicionalmente, se implementó con algunas modificaciones la metodología de decantación descrita por Sheng et al.(2010), basada en la velocidad de sedimentación. Esta consistió en colocar el lodo adaptado en conos imhoff de 1L, agitar suavemente y dejar sedimentar por 2 minutos. Posteriormente se retiró el sobrenadante con el licor mixto, y la biomasa sedimentada fue



seleccionada para usar como inóculo en el reactor. La prueba se repitió hasta lograr el volumen de lodo requerido para el ensayo de PGA.

Aplicación del protocolo

Agua residual sintética: Se implementó como fuente de carbono acetato de sodio trihidratado ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) con concentración media de $1500 \text{ mg DQO L}^{-1}$. La composición de macro y micronutrientes en el agua residual sintética fue adoptada de Martínez and Pascichaná (2019).

Unidad experimental: Se utilizó un reactor fabricado con cilindros de vidrio y accesorios de tubería de material PVC que funcionó en modo discontinuo secuencial (SBR) a través de un microcontrolador (Arduino Uno R3) programado con la plataforma de código abierto arduino, de hardware y software libre. Contó con un volumen de trabajo de 280 mL , una altura útil de $0,98 \text{ m}$ y un diámetro interno de $0,02 \text{ m}$. Adicionalmente, el prototipo incluyó una fuente de alimentación y un recolector de efluente, un sistema de bombeo que se encargó de suministrar el sustrato y extraer el efluente, y un sistema de regulación y control de excesos de fluidos como se observa en la Figura 1. La aplicación de la fuerza cortante se proporcionó desde la parte inferior del reactor mediante aireación y el efluente cumplió una relación de intercambio volumétrico del 50%.

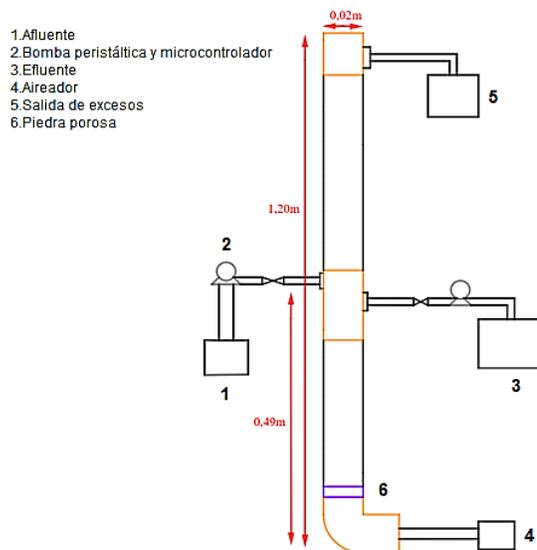


Figura 1 Esquema general del reactor de columna tipo SBR

Parámetros operacionales. Se planteó un conjunto de valores y rangos basados en las experiencias y reportes que fueron encontrados en la literatura especializada y cuyo efecto e influencia sobre la biomasa, estimuló adecuadamente los procesos de agregación y desarrollo celular. Los parámetros operacionales se muestran en la Tabla 1.



Tabla 1. Parámetros utilizados para el protocolo PGA

Parámetro	Valor	Unid.
Operación del reactor	SBR	-
Relación A/D	≥6:1	-
Tiempo de ciclo	3	h
Número de ciclos por día	8	-
Tiempo de sedimentación	15 – 5 – 2	min
Relación de intercambio volumétrico - RIV	50	%
Tiempo de descarga	1	min
TRH	6	h
F/M	0,64	gDQO/gSSV
Sustrato	Acetato	-
DQO del sustrato	1.500	mg.L ⁻¹
Carga orgánica volumétrica	6	kg.m ⁻³ .d ⁻¹
Tiempo de aireación	163 – 173 – 176	min
Velocidad de aireación	2,40 a 3,00	cm.s ⁻¹
OD	0,5 a 6,0	mg.L ⁻¹
pH	6,5 a 8,0	
Temperatura	20 a 25	°C

El ciclo de operación fue de 3 horas y comprendió las etapas de alimentación, aireación, sedimentación y descarga. La configuración de los ciclos y tiempos de fase se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Tiempos en el ciclo de operación

Etapa	Tiempo (min)				Duración (d)
	Alimentación	Aireación	Sedimentación	Tiempo de descarga	
Fase 1	1	163	15	1	8
Fase 2	1	173	5	1	1
Fase 3	1	176	2	1	2

Procedimiento PGA: El procedimiento de aplicación consistió en una serie de pasos acompañados de un seguimiento y recolección de información como se describe a continuación:

1. Determinación de la concentración de DQO en el reactivo de acetato de sodio a emplear mediante una curva de calibración.
2. Preparación previa de las soluciones stock de los macro y micro nutrientes y el sustrato (almacenamiento bajo refrigeración para su dosificación).



3. Verificación de la mezcla completa en el reactor mediante el uso de un marcador visualmente detectable
4. Chequeo del microcontrolador (Arduino)
5. Adaptación del inóculo
6. Inoculación del reactor con el volumen necesario para cumplir la relación F/M establecida.
7. Toma de muestras periódicas del licor mixto durante la aireación (DQO)
8. Durante la operación del reactor se debe realizar la disminución progresiva del tiempo de sedimentación, como recomendación se indicó: 8 días con 15 minutos, 1 día con 5 min y 2 días con 2 minutos; sin embargo, en función de la capacidad de sedimentación y las características de los agregados en la biomasa, pueden ser modificados acorde a cada caso particular.
9. Operación del reactor por aproximadamente 11 días, o menos si se ha observado una agregación del lodo favorable
10. Al finalizar la operación, vaciar el contenido completo del reactor en un recipiente, agitar suavemente y tomar muestra para el ensayo de IVL, velocidad de sedimentación y morfología

Validación de la biomasa

Con el objetivo de validar la aplicabilidad del protocolo, se realizó el seguimiento de las principales variables de comportamiento, las cuales permitieron evaluar el potencial del inóculo de acuerdo a lo mencionado en la literatura (Liu et al., 2008; Khan et al., 2013; Nancharaiyah y Kiran, 2017; Sarma et al., 2017). De esta forma, se llevó a cabo tres tipos de seguimiento que permitieron examinar el desarrollo de la granulación y la capacidad del tratamiento: 1) características fisicoquímicas del afluente y efluente, mediante los análisis de pH, oxígeno disuelto, temperatura y DQO; 2) características fisicoquímicas del lodo, evaluadas con el índice volumétrico del lodo (IVL) y la velocidad de sedimentación, y 3) las características geométricas del lodo, analizadas con redondez, circularidad y diámetro equivalente. Los análisis se efectuaron bajo las metodologías descritas en la Tabla 3.

Tabla 3. Metodologías implementadas en el protocolo de PGA

Variables de control y medición		Análisis	Metodología
Control	pH Temperatura Oxígeno Disuelto		Standard Methods (APHA et al., 2005)
Sustrato	Demanda Química de Oxígeno (DQO)		Standard Methods (APHA et al., 2005)
Lodo	Sólidos suspendidos totales Sólidos suspendidos volátiles		Standard Methods (APHA et al., 2005)
Sedimentación	Índice volumétrico de lodos (IVL) Velocidad de sedimentación		Su and Yu. (2005) y Song et al. (2010)
Morfología	Diámetro equivalente Circularidad y redondez		Beun et al. (1999)



3. Análisis y Resultados

Inóculo

Las condiciones iniciales del inóculo se presentan en la Tabla 4. Se resalta que el valor de la relación F/M difirió con el valor establecido en el protocolo de PGA, debido a que este parámetro puede ser altamente variable, más sin embargo en el mecanismo de granulación aerobia, su valor no es considerado como concluyente. El valor obtenido de IVL fue de 155,57 mg L⁻¹ lo que implica un lodo floculento con características de pobre sedimentación, según lo indicado en la escala de Grady et al. (1999).

Tabla 4. Condiciones iniciales de operación

Parámetro	Valor	Unidades
Sólidos totales	3460	mg.L ⁻¹
Sólidos volátiles	2478	mg.L ⁻¹
DQO (Acetato)	1373,77	mg.L ⁻¹
F/M	1,8	
IVL	155,57	mL.g ⁻¹

Características fisicoquímicas

Durante el transcurso de la aplicación del protocolo, el pH en el medio se mantuvo en el rango establecido (6,5 a 8,5). El comportamiento del oxígeno disuelto fue inestable y tuvo mínimos de hasta 0,2 mg L⁻¹, sin embargo, esto no generó afectación en el desarrollo de la biomasa. A pesar de que los valores obtenidos de COV fueron inferiores a los establecidos en el protocolo, la respuesta de la biomasa fue óptima. En la Tabla 5 se presenta los valores encontrados.

Tabla 5. Características fisicoquímicas – Ensayo PGA

Variable	Unidad	Valor
pH	-	7,34 a 7,99
Temperatura	°C	24,8±0,21
OD	mg L ⁻¹	2,0 ± 2,52
COV	kg (m ³ .d) ⁻¹	5,4 ± 0,19

La DQO presentó un comportamiento estable de remoción al conseguir valores superiores del 85% en tan solo 25 ciclos de operación. Se puede evidenciar que la disminución del tiempo de sedimentación, influye en la biodegradación de la materia orgánica como se observa en la figura 2.



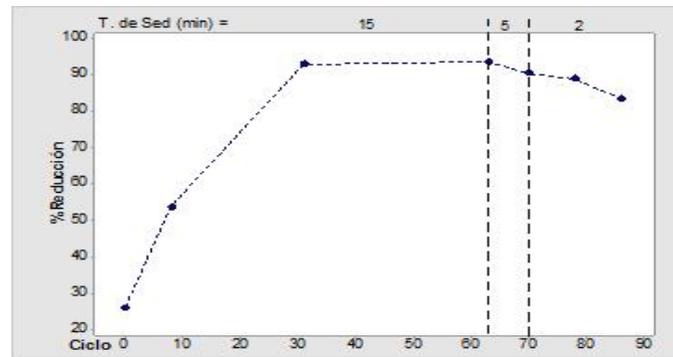


Figura 2. Remoción de la DQO durante la operación del reactor

Características de sedimentación

Se implementaron en la caracterización de la biomasa final los índices de IVL_5 , IVL_{30} y velocidad de sedimentación, obteniendo como resultados $13,89 \text{ mL g}^{-1}$, $13,33 \text{ mL g}^{-1}$ y, respectivamente, lo cual indicó una mejoría en la sedimentabilidad del inoculo inicial ($IVL_{30} 155,57 \text{ mL.g}^{-1}$) después de la aplicación del protocolo PGA. Previos estudios han reportado cambios similares de biomasa floculenta a granular con óptima sedimentabilidad ($208 \text{ a } 40 \text{ mL.g}^{-1}$) (Liu *et al.*, 2003); $152 \text{ a } 62 \text{ mL.g}^{-1}$ (Bao *et al.*, 2009); $240 \text{ a } 60 \text{ mL.g}^{-1}$ (van den Akker *et al.*, 2015). Así mismo, se obtuvo un valor de $0,96$ en la relación IVL_{30}/IVL_5 . Citando a Erşan y Erguder (2014), valores de 1 o cercanos son indicativo de la evolución o transformación a biomasa granular.

La velocidad de sedimentación fue de $25,79 \text{ m h}^{-1}$. De acuerdo con Liu Y *et al.* (2005) para ocasionar una buena granulación aerobia, la velocidad de sedimentación no debe ser inferior a los 8 m h^{-1} . Algunos estudios, han desarrollado granulación aerobia exitosa con velocidades de sedimentación entre 10 m h^{-1} y 15 m h^{-1} (Beun *et al.*, 2002, Othman *et al.*, 2013).

Características morfológicas del lodo

El cambio morfológico de los flocs a agregados fue visible durante el transcurso del protocolo (Figura 3). El proceso evolutivo observado, corresponde al mencionado por Hailei *et al.* (2006): fragmentación de los agregados celulares, colisión, unión, pulimiento, compactación y maduración del gránulo aerobio.

El lodo inoculo estuvo conformado en su mayor parte por flocs de tamaños entre 100 y $150 \mu\text{m}$ aproximadamente, similar a los reportados en los lodos activados por Andreadakis (1993), Zhang *et al.* (1997) y Kuśnierz (2018). Luego de 8 ciclos, los flocs disminuyeron su tamaño predominante a valores con mediana de $60 \mu\text{m}$, esto asociado a la fuerza cortante generada por la aireación y que tiene un impacto importante sobre las estructuras débiles que conforman a los flocs (Liu y Tay, 2002; Pishgar *et al.*, 2018; Tay *et al.*, 2001a).

El ciclo 32 mantuvo diámetros equivalentes muy similares a los del ciclo 8 (mediana $50.37 \mu\text{m}$); sin embargo, se pudo identificar dos tipos de conformaciones predominantes en el licor mixto, flocs de estructuras irregulares, conformados de filamentos que se unen a conjuntos de biomasa y que se asemeja a lo citado en la literatura, la cual afirma que los microorganismos filamentosos



funcionan como esqueletos estructurales en donde las células se agregan y eventualmente se desarrollan como gránulos aerobios (Beun et al., 1999; Ivanov, 2006; Li et al., 2007; López et al., 2009; Zhang et al., 2011), y agregados densos, similares a una esfera rodeados por películas de biofilm, un intermedio entre los flocs mencionados previamente y los gránulos aerobios.

En el ciclo 70 se presentó un aumento significativo en el diámetro equivalente (mediana 1362,8 μm) correspondiente a la conformación de agregados con mayor peso y definición. Los gránulos encontrados presentaron diferentes coloraciones, siendo los más densos oscuros o cafés y los floculentos claros o blanquecinos. Este tipo de morfologías se asemejan en forma y/o color con las obtenidas por diferentes investigaciones (Bao et al., 2009; Bassin et al., 2019; de Kreuk et al., 2005; Liu y Tay, 2015; Su y Yu, 2005).

Para los ciclos 78 y 86 se evidenció sedimentación en la columna a pesar de la aireación suministrada, esto como resultado de la presencia de mayores pesos y tamaños en el lodo evaluado. Se destaca geometrías esféricas y tamaños de hasta 3mm. Por otro lado, se identificaron gránulos en formación, los cuales podrían definirse como aglomerados intermedios, su geometría es indefinida y, en la superficie proliferan microorganismos filamentosos. La proliferación de esta clase de microorganismos es un efecto secundario de la reducción de la fuerza de corte, las agregaciones se tornan esponjosas, como es reportado en la literatura (Chen et al., 2007; Devlin et al., 2017; Liu y Tay, 2002; Tay et al., 2001).

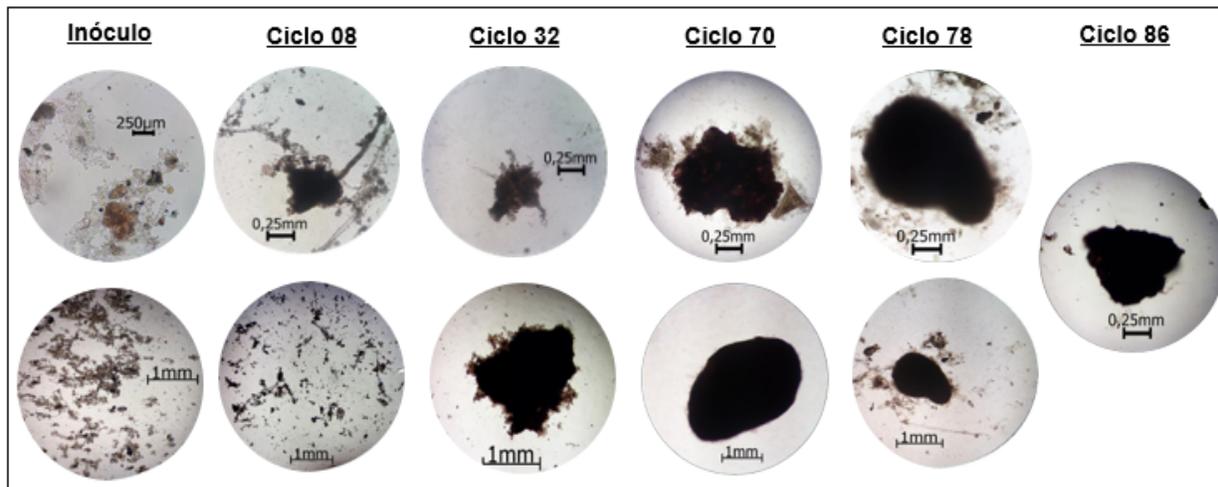


Figura 3. Desarrollo de los agregados durante la experimentación.

Con respecto a las características morfológicas de distribución geométrica, circularidad y redondez, tal como se evidencia en la Figura 4, los gránulos formados presentaron características de circularidad en su mayoría óptimas (0,63 a 0,79). Sin embargo, el parámetro de redondez se encontró por debajo de lo requerido en el protocolo (0,48 a 0,67). Esto último se atribuye a las restricciones encontradas con el burbujeo del aire, como resultado de la acumulación de los gránulos en el fondo del reactor.



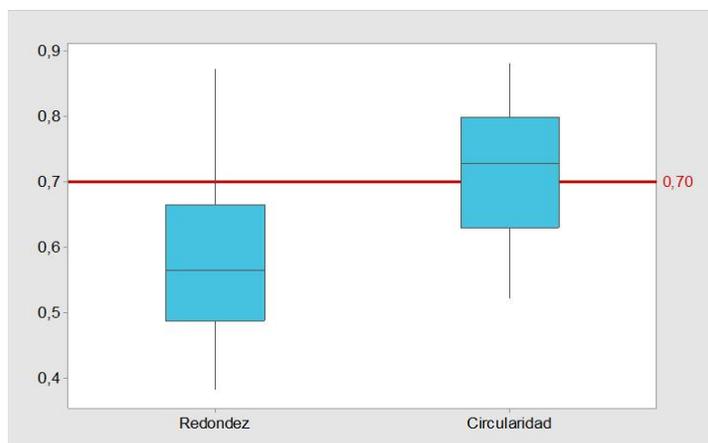


Figura 4. Gráfico de caja de redondez y circularidad para la biomasa granular

Aunque no se alcanzaron las características establecidas, los valores encontrados de redondez y circularidad son similares con los reportes de distintos autores: 0,64 a 0,67 y 0,64 a 0,66 respectivamente (Liu et al., 2003); $0,61 \pm 0,17$ y $0,64 \pm 0,20$ (Li et al., 2007); y 0,6 a 0,7 para las dos características (de Kreuk y van Loosdrecht, 2005).

En lo que respecta al diámetro equivalente, mediante la prueba de Kormogorov-Smirnov, se determinó que el conjunto de diámetros equivalentes de los agregados granulares, no presentó una distribución normal, por lo cual, se utilizó una prueba no paramétrica de Wilcoxon adaptada a las características del conjunto de datos (Haber y Runyon, 1972; Salamanca, 2005). Esta mostró que para la media de las formaciones granulares obtenidas al final del ensayo PGA, el diámetro equivalente se encontró por encima de 0,2 mm.

4. Conclusiones

La configuración de parámetros y los rangos o valores escogidos, así como, las características de operación del protocolo para el ensayo PGA funcionaron integralmente, estimulando procesos agregativos entre células y el posterior desarrollo de gránulos aerobios maduros.

Las características de sedimentabilidad y tamaño de los agregados granulares obtenidos al final del ensayo PGA fueron semejantes con aquellos reportados en la literatura

Con base en los resultados de las propiedades de las agregaciones granulares obtenidas al final del ensayo PGA, se atribuye al lodo inóculo la posibilidad de transformarse en gránulos aerobios. Se destaca la capacidad de acelerar el proceso de granulación, mediante la aplicación del ensayo PGA, alcanzando resultados visibles en un corto periodo (>7 días – ciclo 63) bajo un gasto de recursos e insumos menor.

El protocolo representa una configuración flexible, que permite continuar con la variación de otros parámetros y factores, una vez se ha confirmado el potencial de granulación.

El protocolo representa una base metodológica que puede ser aplicada a diferentes escalas y en diferentes ámbitos, tanto para la investigación como el trabajo de campo.



5. Referencias

Artículos de revistas

- Andreadakis, A. D. (1993). Physical and chemical properties of activated sludge floc. *Water Research*, Vol. 27, No. 12, pp. 1707-1714.
- APHA, A. P. H. A. (1995). *Standard Methods for the Examination for Water and Wastewater* (19th Edition ed.). Springfield, Washington DC.: Byrd Prepress.
- Bao, R., Yu, S., Shi, W., Zhang, X., & Wang, Y. (2009). Aerobic granules formation and nutrients removal characteristics in sequencing batch airlift reactor (SBAR) at low temperature. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 168, No. 2, pp. 1334-1340.
- Bassin, J. P., Tavares, D. C., Borges, R. C., & Dezotti, M. (2019). Development of aerobic granular sludge under tropical climate conditions: The key role of inoculum adaptation under reduced sludge washout for stable granulation. *Journal of Environmental Management*, Vol. 230, pp. 168-182.
- Bello, M.M and Raman, A.A.A. (2017) Trend and current practices of palm oil mill effluent polishing: Application of advanced oxidation processes and their future perspectives *J. Environ. Manage.* Vol. 198, pp. 170-182
- Beun, J. J., Hendriks, A., Van Loosdrecht, M. C. M., Morgenroth, E., Wilderer, P. A., & Heijnen, J. J. (1999). Aerobic granulation in a sequencing batch reactor. *Water Research*, Vol. 33, No. 10, pp. 2283-2290
- Beun, J. J., Van Loosdrecht, M. C. M., & Heijnen, J. J. (2002). Aerobic granulation in a sequencing batch airlift reactor. *Water Research*, Vol. 36, No. 3, pp. 702-712.
- Chen, Y., Jiang, W., Liang, D., & Tay, J. (2007). Structure and stability of aerobic granules cultivated under different shear force in sequencing batch reactors. *Appl Microbiol Biotechnol*, Vol. 76, No. 5, pp. 1199-1208.
- de Kreuk, M., Pronk, M., & van Loosdrecht, M. (2005). Formation of aerobic granules and conversion processes in an aerobic granular sludge reactor at moderate and low temperatures. Vol. 39.
- de Sousa Rollemberg, S. L., Mendes Barros, A. R., Milen Firmino, P. I., & Bezerra dos Santos, A. (2018). Aerobic granular sludge: Cultivation parameters and removal mechanisms. *Bioresource Technology*, Vol. 270, pp. 678-688
- Devlin, T. R., di Biase, A., Kowalski, M., & Oleszkiewicz, J. A. (2017). Granulation of activated sludge under low hydrodynamic shear and different wastewater characteristics. *Bioresource Technology*, Vol. 224, No. Supplement C, pp. 229-235.
- Erşan, Y., & Erguder, T. H. (2014). The effect of seed sludge type on aerobic granulation via anoxic-Aerobic operation. Vol. 35.
- Grady, L., Daigger, G., & Lim, H. (1999). *Biological Wastewater Treatment* (2° Ed ed.). New York.
- Haber, A., & Runyon, R. P. (1972). *Estadística general* (R. M. Lassala, Trans.). México D.F.
- Hailei, W., Guangli, Y., Guosheng, L., & Feng, P. (2006). A new way to cultivate aerobic granules in the process of papermaking wastewater treatment. *Biochemical Engineering Journal*. Vol. 28, No. 1, pp.99-103.
- Ivanov, V. (2006). Chapter 6 Structure of aerobically grown microbial granules. In J.-H. Tay, S. T.-L. Tay, Y. Liu, K.-Y. Show & V. Ivanov (Eds.). *Waste Management Series*. Vol. 6, pp. 115-II.
- Iskandar, M. J., Baharum, A., Anuar, F. H., & Othaman, R. (2018). Palm oil industry in South East Asia and the effluent treatment technology—A review. *Environmental technology & innovation*, Vol. 9, p.p. 169-185
- Khan, M. Z., Mondal, P. K., & Sabir, S. (2013). Aerobic granulation for wastewater bioremediation: A review. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. Vol. 91, No. 6, pp. 1045-1058.



- Kuśnierz, M. (2018). Scale of Small Particle Population in Activated Sludge Flocs. *Water, Air, & Soil Pollution*, Vol. 229, No.10, pp. 327.
- Liu, Y., & Tay, J.-H. (2002). The essential role of hydrodynamic shear force in the formation of biofilm and granular sludge. *Water Research*, Vol. 36, No 7, pp. 1653-1665.
- Liu, Q., Tay, J., & Liu, Y. (2003). Substrate concentration-independent aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor. *Environ Technol*, Vol. 24.
- Liu, Y and Tay, J.H. (2004). State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, Vol. 22, No. 7, pp. 533-563.
- Liu, Y., Wang, Z.-W., & Tay, J.-H. (2005). A unified theory for upscaling aerobic granular sludge sequencing batch reactors. *Biotechnology Advances*, Vol. 23, No. 5, pp. 335–344.
- Liu, Y.-Q., & Tay, J.-H. (2007). Cultivation of aerobic granules in a bubble column and an airlift reactor with divided draft tubes at low aeration rate. *Biochemical Engineering Journal*, Vol. 34, No. 1, pp. 1-7.
- Liu, Y., Qin, L., Wang, Z.-W., Li, Y., & Liu, Q.-S. (2008). *Water Purification: Aerobic Granulation in Sequencing Batch Reactors*: Taylor & Francis Group
- Liu, Y.-Q., & Tay, J.-H. (2015). Fast formation of aerobic granules by combining strong hydraulic selection pressure with overstressed organic loading rate. *Water Research*, Vol. 80, No. Supplement C, pp. 256-266.
- Martínez, G. M. D., & Pascichaná, C. A. H. (2019). Desarrollo de un Sustrato Sintético que Simule el Agua Residual Doméstica para Fines de Investigación. (Ingeniero(a) Sanitario(a) y Ambiental), Universidad del Valle, Santiago de Cali - Colombia.
- López, P. S., Dosta, J., & Mata, Á. J. (2009). Start-up of an aerobic granular sequencing batch reactor for the treatment of winery wastewater. Vol. 60.
- Morgenroth, E., Sherden, T., Van Loosdrecht, M. C. M., Heijnen, J. J., & Wilderer, P. A. (1997). Aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor. *Water Research*. Vol. 31, No. 12, pp. 3191-3194.
- Nancharaiyah, Y. V., & Kiran, K. R. G. (2017). Aerobic granular sludge technology: mechanisms of granulation and biotechnological applications. *Bioresource Technology*. Doi.
- Othman, I., Anuar, A. N., Ujang, Z., Rosman, N. H., Harun, H., & Chelliapan, S. (2013a). Livestock wastewater treatment using aerobic granular sludge. *Bioresource Technology*, Vol. 133, pp. 630–634.
- Pishgar, R., Kanda, A., Gress, G. R., Gong, H., Dominic, J. A., & Tay, J. H. (2018). Effect of aeration pattern and gas distribution during scale-up of bubble column reactor for aerobic granulation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 6, No. 5, pp.6431-6443
- Salamanca, C. J. A. (2005). *Estadística no paramétrica: métodos basados en rangos*. Universidad Nacional de Colombia / Bogotá, 2005.
- Sarma, S. J., Tay, J. H., & Chu, A. (2017). Finding Knowledge Gaps in Aerobic Granulation Technology. *Trends in Biotechnology*, Vol. 35, No.1, pp. 66-78.
- Sheng, G.-p., Li, A.-j., Li, X.-y., & Yu, H.-q. (2010). Effects of seed sludge properties and selective biomass discharge on aerobic sludge granulation. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 160, No.1, pp. 108-114.
- Su, K.-Z., & Yu, H.-Q. (2005). Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Sequencing Batch Reactor Treating Soybean-Processing Wastewater. Vol. 39.
- Tay, J., Liu, Q., & Liu, Y. (2001). The effects of shear force on the formation, structure and metabolism of aerobic granules. *Appl Microbiol Biotechnol*, Vol. 57, No.1-2, pp. 227-233.
- Tay, J. H., Tay Lee, S. T., Show, K.-Y., Yu, L., & Ivanov, V. (2004). Aerobic biomass granules for waste water treatment (U.S. Patent No 6,793,822 B2). U.S. Patent.
- van den Akker, B., Reid, K., Middlemiss, K., & Krampe, J. (2015). Evaluation of granular sludge for secondary treatment of saline municipal sewage. *Journal of Environmental Management*, Vol. 157, pp. 139-145.



- Zhang, B., Yamamoto, K., Ohgaki, S., & Kamiko, N. (1997). Floc size distribution and bacterial activities in membrane separation activated sludge processes for small-scale wastewater treatment/reclamation. *Water Science and Technology*, Vol. 35, No 6, pp. 37-44.
- Zhang, B., Ji, M., Qiu, Z., Liu, H., Wang, J., & Li, J. (2011). Microbial population dynamics during sludge granulation in an anaerobic–aerobic biological phosphorus removal system. *Bioresource Technology*, Vol. 102, No.3, pp. 2474-2480.

Sobre los autores

- **Dayana Grisales Penagos:** Ingeniero Civil, Especialista en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales. dayana.grisales@correounivalle.edu.co
- **Mateo Villarraga Manrique:** Ingeniero Sanitario y Ambiental. mateo.villarraga@correounivalle.edu.co
- **Jenny Rodríguez Victoria:** Ingeniero Sanitario, Master en Ingeniería Civil (Hidráulica y Saneamiento), Doctor en Ingeniería (Hidráulica y Saneamiento). Profesor titular. jenny.rodriguez@correounivalle.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2021 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

