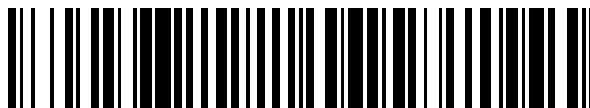


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 702 430**

21 Número de solicitud: 201830932

51 Int. Cl.:

C02F 3/02 (2006.01)

C02F 3/12 (2006.01)

C02F 3/34 (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:

27.09.2018

43 Fecha de publicación de la solicitud:

28.02.2019

Fecha de concesión:

20.09.2019

45 Fecha de publicación de la concesión:

27.09.2019

73 Titular/es:

**UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE
COMPOSTELA (80.0%)
Edificio EMPRENDIA - Campus Vida
15782 Santiago de Compostela (A Coruña) ES y
UNIVERSIDAD ADOLFO IBÁÑEZ (20.0%)**

72 Inventor/es:

**CARRERA FERNÁNDEZ, Paula;
VAL DEL RÍO, María Ángeles;
MOSQUERA CORRAL, Anuska;
LEMA RODICIO, Juan Manuel y
CAMPOS GÓMEZ, José Luís**

74 Agente/Representante:

PARDO SECO, Fernando Rafael

54 Título: **Método y sistema para la eliminación de fósforo, carbono orgánico y nitrógeno mediante biomasa granular aerobia y aeración pulsante**

57 Resumen:

Método y sistema para la eliminación de fósforo, carbono orgánico y nitrógeno mediante biomasa granular aerobia y aeración pulsante. La presente invención se refiere a un método y un sistema para favorecer el desarrollo de organismos acumuladores de biopolímeros, con el objetivo de eliminar fósforo, carbono orgánico y nitrógeno de las aguas residuales industriales o urbanas mediante biomasa granular aerobia y aeración pulsante. El sistema y método emplean un reactor discontinuo secuencial (SBR) con alimentación-reacción anaerobia o con alimentación sin reacción. La aeración pulsante tiene una frecuencia de segundos.

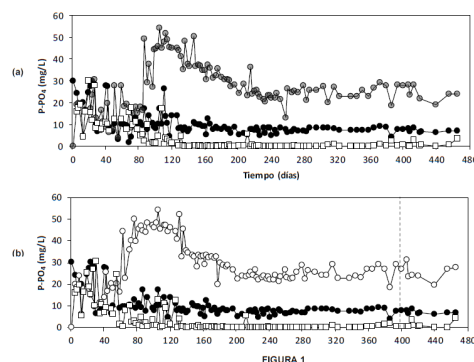


FIGURA 1

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015.
Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

ES 2 702 430 B2

DESCRIPCIÓN

Método y sistema para la eliminación de fósforo, carbono orgánico y nitrógeno mediante biomasa granular aerobia y aeración pulsante

5 SECTOR TÉCNICO DE LA INVENCION

La presente invención se refiere a un método y sistema de tratamiento biológico de aguas residuales con aeración pulsante. Más concretamente la invención se refiere a método y sistema, basado en lodo granular aerobio enriquecido en organismos acumuladores de biopolímeros para la eliminación de fósforo, materia orgánica y nitrógeno.

10 ESTADO DE LA TÉCNICA

La biomasa granular aerobia se desarrolló por primera vez a finales de los años 90. Los desarrollos tecnológicos basados en este tipo de biomasa son escasos, aunque se presentan como una alternativa interesante frente a los tratamientos aerobios convencionales de lodos activos. Estos sistemas ofrecen una serie de ventajas, como son la reducción de la superficie de implantación (no es necesario el uso de decantadores secundarios), reducción de la producción de lodos y de la concentración de sólidos en el efluente del sistema. Sin embargo, en el caso de los gránulos aerobios heterótrofos (con eliminación de materia orgánica) se requieren de largos tiempos de puesta en marcha e implican altos costes de aeración, debido a que es necesario suministrar cantidades elevadas de oxígeno para mantener la agitación del reactor y las reacciones biológicas (A. Mosquera Corral, Tecnologías Avanzadas para el Tratamiento de Aguas Residuales (2ª Edición 2013).

Una alternativa para reducir el tiempo de puesta en marcha del sistema y mejorar las propiedades de los gránulos aerobios heterótrofos puede ser la aplicación de aeración pulsante, ya que ha sido demostrado en otros tipos de procesos que un régimen pulsante puede ayudar al proceso de granulación de la biomasa. En [Franco, A., Roca, E., Lema, J.M. (2006). Granulation in high-load denitrifying upflow sludge bed (USB) pulsed reactors. Water Research 40, 871– 880] se apuntó a que el uso de un flujo de alimentación (agua residual) pulsante en reactores UASB (en inglés: Upflow Anaerobic Sludge Blanket) mejoró la granulación de la biomasa anaerobia y la densidad específica de gránulos anaerobios formados, reduciendo el lavado de estos y mejorando la estabilidad y eficiencia del proceso. El flujo de líquido pulsante ayudó a mantener concentraciones de sólidos más altas (47,6 g SSV/L) que en un reactor sin pulsación con alimentación líquida en continuo (16 g SSV/L),

- debido a que la velocidad de sedimentación de la biomasa era alta (88 m/h en el reactor con pulsación, no aportan datos sobre la velocidad de sedimentación en el reactor sin pulsación). Lo mismo ocurrió en [Belmonte, M., Vázquez Padín, J.R., Figueroa, M., Mosquera-Corral, A., Campos, J.L., Méndez, R. (2009). Characteristics of nitrifying granules developed in an air pulsing SBR. *Process Biochemistry* 44, 602–606.], en donde se propone un sistema de biomasa granular autótrofa enriquecida en bacterias nitrificantes (solamente para la eliminación de nitrógeno) en un SBR (en inglés: Sequencing Batch Reactor), a pesar de que el régimen pulsante que utilizaron fue en la aeración, este no fue suficiente para resuspender la biomasa y fue necesario utilizar otras estrategias.
- 10 Por otro lado, el control del aporte de aire permite también favorecer la eliminación de nitrógeno mediante los procesos biológicos combinados de nitrificación-desnitrificación. En concreto se favorece la desnitrificación, que es un proceso que sucede en condiciones de ausencia de oxígeno y permite transformar el nitrato, producido por oxidación de amonio durante la nitrificación, a nitrógeno gas. Se han empleado distintas estrategias de operación
- 15 con el objetivo de reducir la cantidad de oxígeno aportada al sistema durante el periodo de aeración para favorecer así los procesos de desnitrificación y reducir los costes de aeración. Las estrategias se basan, bien en la alternancia de etapas aerobias y anóxicas (ausencia de oxígeno disuelto) o en la reducción de la concentración de oxígeno en el medio mediante aeración continua.
- 20 En [Lochmatter S., Gonzalez-Gil, G., Holliger, C. (2013). Optimized aeration strategies for nitrogen and phosphorus removal with aerobic granular sludge. *Water Research* 47(16), 6187-6197] operaron un reactor con aeración intermitente, con alternancia de periodos de 6 - 10 min de aporte de aire y 7 - 12 min sin aporte de aire y sin el uso de agitación mecánica, para eliminar materia orgánica, nitrógeno y fósforo mediante el cultivo de PAOs (Phosphate
- 25 Accumulating Organisms). Con esta estrategia obtuvieron eficacias de eliminación de 78% de nitrógeno y 95% de fósforo (no aportan información sobre la eliminación de materia orgánica) y gránulos con buena sedimentabilidad (IVL₈, Índice Volumétrico de Lodos a los 8 minutos, de 19 mL/g SST). Sin embargo, partieron ya de biomasa granular formada previamente en condiciones de aeración continua.
- 30 En [Li J., Elliott D., Nielsen M., Healy M.G., Zhan X. (2011). Long-term partial nitrification in an intermittently aerated sequencing batch reactor (SBR) treating ammonium-rich wastewater under controlled oxygen-limited conditions. *Biochemical Engineering Journal* 55, 215– 222] optaron por la alternancia de 30 min de aeración y agitación y 10 min de agitación mecánica sin aeración. Se trata por lo tanto de aeración continua en ciertos momentos

operacionales seguida de fases anóxicas. Además, fue necesaria la incorporación de una unidad adicional para la mezcla del reactor (agitador mecánico). El proceso desarrollado por estos autores es un sistema que sólo elimina nitrógeno y materia orgánica, sin utilizar biomasa granular. Como resultado de la operación del reactor se desarrolló biomasa con sedimentabilidad mala con respecto a los gránulos, con valores de IVL de 110 mL/g SST frente a valores típicos de gránulos menores de 60 mL/g SST.

En [Jiang, X., Yuan, Y., Ma, F., Tian, J., Wang, Y. (2014). Enhanced biological phosphorus removal by granular sludge in anaerobic/aerobic/anoxic SBR during start-up period. *Desalination and Water Treatment* 57(13), 5760-5771] optaron por la introducción de una fase anóxica (80 - 148 min) tras el período de aeración (180 - 140 min), para desarrollar las PAOs, con distinta duración en función de la etapa de operación. A pesar de alcanzar buenos porcentajes de eliminación de 88,5% de eliminación de nitrógeno total, 90% de eliminación de fósforo y 80% de eliminación de DQO (Demanda Química de Oxígeno), el proceso de granulación fue lento, siendo necesarios 80 días para obtener un sistema completamente granular.

En [Lu, Y., Wang, H., Kotsopoulos, T., Zeng, R. (2016). Advanced phosphorus recovery using a novel SBR system with granular sludge in simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal process. *Appl. Microbiol Biotechnol* 100, 4367-4374] también operaron un reactor SBR para desarrollar PAOs. En este caso decidieron reducir la concentración de oxígeno disuelto durante el período de aeración hasta valores de 0,79 - 1,56 mg/L de oxígeno disuelto. Sin embargo, en este caso, las propiedades físicas de la biomasa obtenida fueron malas, estando constituida mayoritariamente por lodo activo floculento o bien biomasa granular con diámetros de partícula en el límite mínimo del tamaño que se considera para biomasa granular de 0,2 mm. Esto fue debido al bajo nivel de estrés al que se vio sometida la biomasa por el bajo caudal de aeración.

Por otro lado, existen patentes basadas en el uso de aeración intermitente que tienen como objetivo reducir el consumo energético del sistema, tanto para procesos biológicos como para tareas de limpieza.

En CN 104944701 (A) se presenta un proceso consistente en tres reactores conectados en serie (reactor anaerobio-aerobio-anóxico) para la eliminación de DQO, nitrógeno y fósforo con aeración intermitente en la cámara aerobia. Sin embargo, la aeración intermitente consiste en subdividir el reactor aerobio en zonas independientes a las que se suministra aire en tiempos diferentes. No se trata de una aeración pulsante, sino continua en ciertos

momentos operacionales en cada una de las zonas del reactor aerobio. Además, no se trata de biomasa granular.

En CN203728642 (U) se presenta un proceso para la eliminación de DQO y nitrógeno que incluye un reactor dividido en compartimentos (compartimento anóxico-compartimento aerobio-membrana) que operan de forma secuencial, con aeración pulsante en la zona de la membrana para fines de limpieza de la misma. A pesar del uso de aeración pulsante, ésta no es responsable de los procesos biológicos de eliminación de DQO y nitrógeno, se emplea únicamente para limpiar la membrana.

En JPH09192688 (A) se presenta un sistema para la eliminación de DQO y nitrógeno consistente en una cámara de lodos activos con aeración intermitente y una de membrana, que operan de forma secuencial. Los tiempos de aeración/no aeración son de 30 - 60 s y 5 - 20 min. En este caso no se elimina fósforo y no se trata de biomasa granular.

En US 2013/0175217 A1 se presenta un sistema de membranas sumergidas para procesos de filtración, empleando aeración intermitente para eliminar la adhesión de biomasa y sólidos en la superficie de las membranas. A pesar de aplicar períodos de aeración cortos (aeración de 0,5 – 20 s y no aeración de 5 – 40 s), no se trata de biomasa granular ni de un proceso biológico. La aeración tiene simplemente función de limpieza, no se utiliza para procesos biológicos de eliminación.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

Ninguno de los sistemas del estado de la técnica ha sido aplicado en sistemas de biomasa granular aerobia constituida por organismos acumuladores de biopolímeros, y la aeración pulsante no tiene como objetivo la mejora de las propiedades físicas de la biomasa granular ni la disminución del tiempo de puesta en marcha del sistema.

Para obtener biomasa granular es necesario promover el desarrollo de microorganismos de lento crecimiento, ya que tienden a crecer formando agregados. Para esto se suelen utilizar reactores SBR, ya que permiten la alternancia de períodos de saciedad/hambruna, que crean gradientes de concentración de sustrato y ayudan al desarrollo de estos microorganismos. Este tipo de reactores operan de forma secuencial en distintas fases: alimentación (puede ser sin reacción o con reacción anaerobia), aeración, sedimentación y descarga. La etapa de sedimentación actúa también como un proceso de selección de los microorganismos, permitiendo que solo aquellos que son capaces de formar agregados y tienen una velocidad mínima de sedimentación permanezcan en el sistema.

Dentro de los organismos de crecimiento lento y acumuladores de biopolímeros están los acumuladores de fósforo o PAOs, que son capaces de eliminar tanto fósforo como materia orgánica. Para que se desarrollen es necesaria la alternancia de periodos anaerobios y aerobios/anóxicos, por lo tanto, la etapa de alimentación del reactor se realiza en condiciones anaerobias. El metabolismo de estos organismos funciona de forma que, durante la etapa de alimentación anaerobia son capaces de almacenar materia orgánica en el interior de sus células, liberando fósforo (almacenado como poli-fosfato dentro de las células) al medio líquido. Una vez terminada la etapa de alimentación, durante el periodo de hambruna (aerobio), la materia orgánica almacenada es usada para crecimiento y el fósforo liberado previamente es almacenado de nuevo. Una forma sencilla de corroborar la presencia de PAOs en el reactor es a través de la relación entre los sólidos en suspensión volátiles (SSV) y totales (SST), ya que la biomasa enriquecida en estos organismos suele tener valores de SSV/SST en torno al 60% debido al fósforo que precipita dentro de las células en forma de compuesto inorgánico, poli-fosfato. Otro indicador del desarrollo de estos microorganismos es el hecho de que, tras finalizar la etapa de alimentación anaerobia, la concentración de fósforo en el medio líquido es mayor que al comienzo del ciclo, ya que es liberado al medio para ser absorbido de nuevo en la fase aerobia, y disminuye al final de la fase aerobia cuando se retira el efluente.

En el caso de la etapa de alimentación sin reacción los organismos de crecimiento lento acumulan los biopolímeros en la etapa de reacción aerobia. Una vez terminada la reacción biológica (acumulación de la materia orgánica en forma de biopolímeros en el interior de las células), durante el periodo de hambruna (aerobio), la materia orgánica almacenada es usada para crecimiento.

Para alcanzar buenas eficacias simultáneas de eliminación de diferentes contaminantes [de Kreuk, M.K., Heijnen, J.J., van Loosdrecht, M.C.M. (2005). Simultaneous COD, nitrogen and phosphate removal by aerobic granular sludge. *Biotechnology and Bioengineering* 90(6), 762-769] fueron capaces de obtener eliminaciones de 100% de materia orgánica, 94% de nitrógeno y 94% de fósforo), es necesaria la formación de gránulos con buenas propiedades físicas para evitar el lavado de biomasa del sistema y asegurar la estabilidad del proceso. Estas propiedades incluyen diámetros de partícula óptimos (normalmente entre 1 - 3 mm), así como buenos valores de densidad de lodo (entre 40 y 60 g SSV/L_{gránulo}) y velocidad de sedimentación mayor de 10 m/h. Además, es importante que la superficie de los gránulos sea lisa y sin presencia de bacterias filamentosas.

Para obtener gránulos con buenas propiedades es necesario garantizar un nivel de estrés mínimo en el reactor. Se suele expresar en términos de velocidad ascensional del aire utilizado durante la etapa de aeración del reactor, de forma que el valor mínimo para obtener gránulos estables es de 1,2 cm/s. La forma más habitual de suministrar aire al sistema es a través de aeración continua, lo que implica altos costes.

La presente invención se diferencia de los trabajos descritos anteriormente puesto que se trata de un sistema que, tras la alimentación sin reacción o con reacción anaerobia, realiza el aporte de aire de forma pulsante durante la fase aerobia, con una frecuencia de segundos. Con esta opción de aeración pulsante se consigue favorecer el desarrollo de organismos acumuladores de biopolímeros y además acortar el tiempo de puesta en marcha de los reactores de biomasa granular aerobia, disminuyendo el tiempo necesario para el proceso de granulación. Además, la aeración pulsante mejora las propiedades físicas de los gránulos, como la densidad, y les confiere estabilidad. Esto último es muy importante, ya que hasta el momento la aplicación de estos sistemas a escala real ha estado limitada por eventos de baja estabilidad de los agregados formados. Por tanto, resolver el problema de estabilidad de los gránulos aerobios tiene como consecuencia una operación más eficiente a escala industrial. Una vez completado el proceso de granulación, la aeración pulsante permite además la reducción de costes asociados al consumo de aire.

El régimen pulsante implica que, aportando un volumen de aire equivalente al aportado por la aeración continua, el caudal en cada pulso es mayor. Esto permite aumentar la velocidad ascensional durante cada pulso y por lo tanto incrementar el nivel de estrés y, consecuentemente, mejorar las propiedades de los gránulos formados. Una vez obtenida la biomasa granular aerobia se opta por un caudal de aire en cada pulso igual al aportado por la aeración continua, de forma que la velocidad ascensional del gas es la misma, pero el volumen total de aire aportado al sistema es menor.

En un aspecto la presente invención se refiere a un sistema de tratamiento de aguas residuales urbanas o industriales mediante biomasa granular caracterizado porque comprende:

a) un reactor que permite el desarrollo de gránulos de biomasa conteniendo organismos acumuladores de biopolímeros y donde se introduce el agua residual a tratar; y

b) una unidad de aeración pulsante

donde el reactor opera en ciclos que permiten la formación de biomasa granular y comprenden una primera etapa de alimentación, una segunda etapa de reacción aerobia, una tercera etapa de sedimentación y una cuarta etapa de vaciado del efluente, donde la unidad de aeración pulsante controla el aporte de aire al reactor durante la segunda etapa de reacción aerobia.

La etapa de alimentación se selecciona de entre una etapa de alimentación-reacción anaerobia o una etapa de alimentación sin reacción.

Si la etapa de alimentación es una etapa de alimentación-reacción anaerobia, esta tiene una duración preferente de $1/3$ del ciclo de operación de reactor.

10 Si la etapa de alimentación es una etapa de alimentación sin reacción, esta tiene una duración preferente de entre 5 minutos y 30 minutos.

El sistema objeto de la presente invención elimina carbono orgánico y/o nitrógeno del efluente retirado en la etapa de vaciado, donde la eliminación de carbono orgánico (expresado como DQO) y nitrógeno del efluente está comprendida en el rango 77% a 92% y 15 23% a 43%, respectivamente. En otro aspecto el sistema de la presente invención, en el caso de que la etapa de alimentación sea una etapa de alimentación-reacción anaerobia, además elimina fósforo del efluente con una eficacia comprendida en el rango 89% a 100%.

En otro aspecto de la invención el reactor es un reactor discontinuo secuencial (SBR).

La unidad de aeración pulsante emite pulsos de aire con una velocidad ascensional comprendida en el rango 1.2 – 3.6 cm/s. En una realización particular la velocidad 20 ascensional de aire preferente es de 3.6 cm/s. La unidad de aeración pulsante emite pulsos de aire con una periodicidad comprendida en el rango 2,5 s – 11,5 s, teniendo dichos pulsos una duración comprendida en el rango 0,5 s a 1,5 s, en una realización preferente la duración de los pulsos es de 1 s. La unidad de aeración bloquea la emisión de pulsos de 25 aire durante un período de tiempo comprendido en el rango 2 s a 10 s, en una realización preferente la unidad de aeración bloquea la emisión de pulsos preferentemente durante 2 s.

En otro aspecto del sistema objeto de la presente invención el índice volumétrico de lodos medido a los 5 minutos (IVL_5) en la etapa de vaciado está comprendido en el rango 40 a 60 mL/g SST.

30 En otro aspecto del sistema objeto de la presente invención el diámetro de partícula de la biomasa granular está comprendido en el rango 1 mm a 3 mm.

En otro aspecto la presente invención se refiere a un método tratamiento de aguas residuales urbanas o industriales mediante biomasa granular en aguas residuales caracterizado porque el ciclo de operación comprende las siguientes fases:

- 5 a) una fase de alimentación en la que se introduce el agua residual a tratar en un reactor que permite el desarrollo de organismos acumuladores de biopolímeros;
- b) una fase aerobia con aeración pulsante;
- c) una fase de sedimentación de la biomasa granular; y
- d) una fase de vaciado del efluente del reactor.

10 La fase de alimentación se selecciona de entre una fase de alimentación-reacción anaerobia o una fase de alimentación sin reacción.

Si la fase de alimentación es una fase de alimentación-reacción anaerobia, esta tiene una duración preferente de 1/3 del ciclo de operación de reactor.

15 Si la fase de alimentación es una fase de alimentación sin reacción, esta tiene una duración preferente de entre 5 minutos y 30 minutos.

El método objeto de la presente invención está caracterizado porque elimina carbono orgánico y/o nitrógeno del efluente. La eliminación de carbono orgánico (expresado como DQO) y nitrógeno del efluente mediante el método está comprendida en el rango 77% a 92% y 23 % a 43%, respectivamente. En otro aspecto del método objeto de la presente
20 invención, si la fase de alimentación es una etapa de alimentación-reacción anaerobia, también se elimina fósforo del efluente, estando la eliminación de fósforo del efluente retirado en la etapa de vaciado comprendida en el rango 89% a 100%.

En otro aspecto del método objeto de la presente invención en la fase de aeración pulsante se emiten pulsos de aire con una velocidad ascensional comprendida en el rango 1.2 – 3.6
25 cm/s, en una realización preferente la velocidad ascensional es de 3.6 cm/s. Durante la fase de aeración pulsante se emiten pulsos de aire con una periodicidad comprendida en el rango 2,5 s – 11,5 s. En otro aspecto del método la duración de los pulsos de aire tiene una duración comprendida en el rango 0,5 s a 1,5 s, en una realización preferente la duración de los pulsos de aire es de 1 s. En otro aspecto del método en la fase de aeración se bloquea
30 la emisión de pulsos de aire durante un período de tiempo comprendido en el rango 2 s a 10

s, en una realización preferente el bloqueo de pulsos de aire tiene una duración preferente de 2 s.

En otro aspecto del método el índice volumétrico de lodos medido a los 5 minutos (IVL₅) en la etapa de vaciado está comprendido en el rango 40 a 60 mL/g SST.

- 5 En otro aspecto la presente invención se refiere al uso del sistema y del método para la eliminación simultánea de fósforo, carbono orgánico y/o nitrógeno en aguas residuales o industriales.

Por lo tanto, la invención consiste en la aplicación de un sistema de pulsación de aire como una estrategia para favorecer el desarrollo de organismos acumuladores de biopolímeros, reducir el tiempo de puesta en marcha y mejorar la estabilidad de un sistema con biomasa granular aerobia para la eliminación de fósforo, materia orgánica y nitrógeno del agua residual. Además, una vez obtenidos gránulos maduros, también tiene como objetivo la mejora de la actividad biológica, en especial de eliminación de nitrógeno, y la reducción del volumen de aire que es necesario aportar al sistema.

15 BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

Las modalidades detalladas en las figuras se ilustran a modo de ejemplo y no a modo de limitación:

La **Figura 1** muestra la evolución de la concentración de fósforo en el influente (●), al final de la fase anaerobia (○) y al final de la fase aerobia (□), para el reactor “Control” (a) y “Pulsante” (b) durante las dos etapas de operación. De la comparación de ambas gráficas se puede extraer que la liberación de fósforo en la fase anaerobia comienza antes en el reactor “Pulsante” que en el reactor “Control”, indicador del desarrollo de las PAOs. La línea discontinua representa el cambio de la primera etapa a la segunda en el reactor “Pulsante”.

La **Figura 2** muestra la evolución de la concentración de sólidos totales (SST, ○) y volátiles (SSV, ●) para el reactor “Control” (a) y “Pulsante” (b), en las dos etapas de operación establecidas. Se puede observar como la diferencia entre SST y SSV se incrementa antes en el reactor “Pulsante” que en el “Control”, indicador del desarrollo de las PAOs. La línea discontinua representa el cambio de la primera a la segunda etapa en el reactor “Pulsante”.

La **Figura 3** muestra el perfil de concentración de P-PO₄ (●) y de COT (Carbono Orgánico Total, ○) para los reactores “Control” (a) y “Pulsante” (b) durante un ciclo operacional de 3 horas.

La **Figura 4** muestra la evolución de los porcentajes de eliminación de DQO ($\circ$), nitrógeno ($\triangle$) y fósforo ($\bullet$) del reactor "Control" (a) y el "Pulsante" (b) durante las distintas etapas operacionales. La línea discontinua representa el cambio de la primera a la segunda etapa en el reactor "Pulsante".

5

EJEMPLOS O DESCRIPCIÓN DETALLADA

En un ejemplo que ilustra la invención se ha llevado a cabo la operación de un reactor durante 16 meses. Durante dicha operación se partió de lodo convencional de depuradora (floculento) con el objetivo de desarrollar biomasa granular aerobia enriquecida en PAOs.

- 10 Se pusieron en marcha dos reactores geoméricamente idénticos de 1,7 L de volumen útil cada uno, inoculados con lodo activo procedente de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Calo-Milladoiro (A Coruña). Los reactores se alimentaron con un medio sintético simulando un agua residual conteniendo materia orgánica (190 mg DQO/L), nitrógeno (23,6 mg N-NH₄⁺/L) y fósforo (13 mg P-PO₄⁻/L).
- 15 Ambos reactores se operaron como SBR en ciclos de operación de 3 horas distribuidos en las siguientes fases: 60 min alimentación-reacción anaerobia, 112 min reacción aerobia, 1 - 7 min sedimentación, 7 - 1 min de vaciado. En uno de ellos, denominado reactor "Control", se estableció un sistema de aeración continua durante la fase aerobia. En el otro, denominado reactor "Pulsante", se optó por un aporte de aire mediante pulsos de 1
- 20 segundo, seguido de 2 segundos sin aeración (pulso 1 ON/2 OFF en segundos). La operación de 465 días se dividió en dos etapas dependiendo del caudal de aire aplicado en el reactor "Pulsante". No se realizó ningún control de la concentración de oxígeno disuelto, de forma que en ambos reactores tomó el valor de saturación durante la fase aerobia (sobre 8 mg O₂/L).
- 25 En la Etapa I (días 0 - 397) el caudal del pulso de aire de 1 segundo se fijó de forma que, al final del período de aeración, el volumen de aire aportado al sistema fuera el mismo que en el reactor "Control". De esta forma durante los 112 minutos de la fase de aeración se introdujo el mismo volumen de aire (448 litros) en ambos reactores, pero en el reactor "Pulsante" durante cada pulso de aire introducido la velocidad ascensional aplicada fue 3
- 30 veces mayor (3,6 cm/s) que la aplicada en el reactor "Control" (1,2 cm/s). En esta primera fase de operación el tiempo de sedimentación se redujo gradualmente de 7 a 2 minutos (día 99) y finalmente 1 minuto (día 128) en ambos reactores.

En la Etapa II (días 398 - 465) el caudal durante el pulso de aire de 1 segundo aplicado en el reactor "Pulsante" se redujo 3 veces, de forma que ambos reactores estuvieron expuestos a la misma velocidad ascensional de 1,2 cm/s. Sin embargo, el aporte total de aire en el período de aeración fue diferente. En el reactor "Pulsante" fue de 149 litros, mientras que en el reactor "Control" se mantuvo en 448 litros.

Tabla 1: Características de la etapa de aeración en ambos reactores

Reactor	Días operacionales	Tipo aeración	Velocidad ascensional (cm/s)	Total aire (L)
Control	0-480	Continua	1,2	448
Pulsante	Etapa I (0 - 397)	Pulso: 1 s ON/2 s OFF	3,6	448
	Etapa II (398 - 480)	Pulso: 1 s ON/2 s OFF	1,2	149

Las diferencias en las estrategias de aeración se vieron reflejadas en el proceso de granulación de la biomasa, así como en la eliminación de fósforo. En el reactor "Pulsante" se completó el proceso de granulación aproximadamente 10 días antes que en el reactor "Control", y las PAOs se desarrollaron unos 20 días antes, lo que se ve reflejado tanto en los porcentajes de eliminación y concentraciones de fósforo al final de la fase anaerobia (FIGURA 1), como en la relación entre los sólidos en suspensión volátiles y totales, que disminuyó hasta un valor aproximado del 60%, típico de gránulos dominados por PAOs (FIGURA 2). Otra forma de confirmar este hecho es observando el resultado del análisis de sendos ciclos de operación medidos para ambos reactores en el día 91 de operación (FIGURA 3). Se puede ver claramente que el reactor "Control" tiene el pico de concentración de fósforo desplazado de los 60 minutos de alimentación, que es cuando acaba la fase anaerobia, y no toda la materia orgánica es consumida en la fase anaerobia. En cambio, el perfil de fósforo en el reactor "Pulsante" no tiene el pico de la concentración de fósforo desplazado y no hay un incremento de la materia orgánica al final de la fase anaerobia, lo que indica que las PAOs fueron capaces de utilizarla para la liberación de fósforo. Además, la liberación de fósforo es mayor en este caso, 45 mg P-PO₄⁻/L en comparación con 37 mg P-PO₄⁻/L en el reactor control.

Además de acortar el tiempo para el proceso de granulación, la aeración pulsante provocó también la aparición de gránulos con mejores propiedades físicas, ya que el Índice Volumétrico de Lodos medido a los 5 minutos (IVL₅) y el diámetro de partícula son menores en el reactor "Pulsante" (30 mL/g SST y 3,14 mm, respectivamente) que en el reactor

"Control" (40 mL/g SST y 3,45 mm respectivamente). Además, en el reactor "Pulsante" se obtuvieron gránulos más densos (Tabla 2).

Las eficacias de eliminación del reactor "Control" fueron $28,3 \pm 10,3\%$ de nitrógeno, $96,3 \pm 7,2\%$ de fósforo y $82,8 \pm 7,0\%$ de DQO (FIGURA 4a). En el reactor "Pulsante" los porcentajes fueron $32,9 \pm 9,6\%$ de nitrógeno, $95,6 \pm 6,2\%$ de fósforo y $84,3 \pm 7,2\%$ de DQO (FIGURA 4b).

Una vez operados ambos reactores con el mismo caudal total de aeración y diferente velocidad superficial durante 397 días, se redujo la cantidad de aire aportado en el reactor "Pulsante" para tener una velocidad ascensional de 1,2 cm/s. Tras operar el reactor con esta condición durante 67 días las eficacias de eliminación siguieron siendo similares, con valores de $36,6 \pm 8,7\%$ de nitrógeno, $94,6 \pm 3,3\%$ de fósforo y $86,3 \pm 2,7\%$ de DQO. Las características de la biomasa fueron un IVL_5 de 45 mL/g SST y un tamaño medio de gránulo de 1,90 mm. Esto indica que los resultados obtenidos son muy similares a los del reactor "Control", con la diferencia de que en este caso el volumen de aire es tres veces menor.

Tabla 2: Resumen de los resultados obtenidos de los reactores "Control" y "Pulsante"

	CONTROL	PULSANTE	
Velocidad ascensional (cm/s)	1,2	2,0	1,2
Volumen total de aire (L)	448	448	149
Tiempo granulación (días)	48	38	-
Tiempo desarrollo PAOs (días)	80	60	-
Diámetro de partícula (mm)	3,45	3,14	1,90
IVL_5 (mL/g SST)	$82,14 \pm 47,60$	$81,11 \pm 46,85$	$37,29 \pm 7,61$
Densidad (g/L _{gránulo})	$44,24 \pm 19,88$	$60,02 \pm 30,23$	$62,13 \pm 31,91$
TSS (g/L)	$4,58 \pm 1,84$	$4,60 \pm 1,97$	$6,65 \pm 0,82$
Eliminación DQO (%)	$82,8 \pm 7,0$	$84,3 \pm 7,2$	$86,3 \pm 2,7$
Eliminación N (%)	$28,3 \pm 10,3$	$32,9 \pm 9,6$	$36,6 \pm 8,7$
Eliminación P (%)	$96,3 \pm 7,2$	$95,6 \pm 6,2$	$94,6 \pm 3,3$

Por lo tanto, se puede concluir que el aporte de aire de forma pulsante favoreció el desarrollo de los PAOs, reduciendo por lo tanto el periodo de granulación y el tiempo necesario para alcanzar altas eficacias de eliminación. Esto fue debido a que, aportando un mismo volumen de aire, el nivel de estrés al que se vio sometida la biomasa fue mayor, al aportarse caudales puntuales de aire mayores. Tras la reducción del flujo de aire para que el

volumen total aportado al sistema fuese el mismo que en el régimen continuo, los resultados siguieron siendo los mismos, manteniéndose tanto las propiedades de la biomasa como las eficacias de eliminación alcanzadas previamente. La diferencia es que el aporte de aire realizado es menor, lo que reduce los costes asociados a la aeración.

REIVINDICACIONES

- 1- Un sistema de tratamiento de aguas residuales urbanas o industriales mediante biomasa granular caracterizado porque comprende:
 - 5 a) un reactor que permite el desarrollo de gránulos de biomasa conteniendo organismos acumuladores de biopolímeros y donde se introduce el agua residual a tratar; y
 - b) una unidad de aeración pulsante
- 10 caracterizado porque el reactor opera en ciclos que comprenden una primera etapa de alimentación, una segunda etapa de reacción aerobia, una tercera etapa de sedimentación y una cuarta etapa de vaciado del efluente, produciendo dichos ciclos partículas de biomasa granular, donde la unidad de aeración controla la aeración del reactor durante la segunda etapa de reacción aerobia.
- 15 2- El sistema, según la reivindicación 1, caracterizado porque la etapa de alimentación es una etapa de alimentación-reacción anaerobia.
- 3- El sistema, según la reivindicación 2, caracterizado porque la duración de la etapa alimentación-reacción anaerobia es de 1/3 del ciclo de operación de reactor.
- 4- El sistema, según la reivindicación 1, caracterizado porque la etapa de alimentación es una etapa de alimentación sin reacción.
- 20 5- El sistema, según la reivindicación 4, caracterizado porque la etapa de alimentación sin reacción tiene una duración preferente de entre 5 minutos y 30 minutos.
- 6- El sistema, según las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque elimina carbono orgánico y nitrógeno del efluente retirado en la etapa de vaciado.
- 25 7- El sistema, según la reivindicación 6, caracterizado porque la eliminación de carbono orgánico, expresado como DQO, del efluente está comprendida en el rango 77% a 92%.
- 8- El sistema, según la reivindicación 6, caracterizado porque la eliminación de nitrógeno del efluente está comprendida en el rango 23 % a 43%.
- 30 9- El sistema, según las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado porque además se elimina fósforo.

- 10-El sistema, según la reivindicación 9, caracterizado porque la eliminación de fósforo del efluente está comprendida en el rango 89% a 100%.
- 11-El sistema, según la reivindicación 1, caracterizado porque el reactor es un reactor discontinuo secuencial (SBR).
- 5 12-El sistema, según la reivindicación 1, caracterizado porque la unidad de aeración pulsante emite pulsos de aire con una velocidad ascensional comprendida en el rango 1.2 – 3.6 cm/s.
- 13-El sistema, según la reivindicación 12, caracterizado porque la velocidad ascensional de aire preferente es de 3.6 cm/s.
- 10 14-El sistema, según la reivindicación 1, caracterizado porque la unidad de aeración pulsante emite pulsos de aire con una periodicidad comprendida en el rango 2,5 s – 11,5 s.
- 15-El sistema, según las reivindicaciones 1 y 12, caracterizado porque los pulsos de aire emitidos por la unidad de aeración tienen una duración comprendida en el rango 0,5 s a 1,5 s.
- 15 16-El sistema, según la reivindicación 15, caracterizado porque la duración preferente de los pulsos de aire emitidos por la unidad de aeración es de 1 s.
- 17-El sistema, según las reivindicaciones 1 y 14, caracterizado porque la unidad de aeración bloquea la emisión de pulsos de aire durante un período de tiempo comprendido en el rango 2 s a 10 s
- 20 18-El sistema, según la reivindicación 17, caracterizado porque la unidad de aeración bloquea la emisión de pulsos preferentemente durante 2 s.
- 19-El sistema, según la reivindicación 1, caracterizado porque el índice volumétrico de lodos medido a los 5 minutos (IVL₅) está comprendido en el rango 40 a 60 mL/g SST.
- 25 20-El sistema, según la reivindicación 1, caracterizado porque el diámetro de partícula de la biomasa granular está comprendido en el rango 1 mm a 3 mm.
- 21-Un método tratamiento de aguas residuales urbanas o industriales mediante biomasa granular caracterizado porque el ciclo de operación comprende las siguientes fases:

- a) una fase de alimentación en la que se introduce el agua residual a tratar en un reactor que permite el desarrollo de organismos acumuladores de biopolímeros;
- b) una fase aerobia con aeración pulsante;
- 5 c) una fase de sedimentación de la biomasa granular; y
- d) una fase de vaciado del efluente del reactor.

22-El método, según la reivindicación 21, caracterizado porque la fase de alimentación es una fase de alimentación-reacción anaerobia.

10 23-El método, según la reivindicación 22, caracterizado porque la duración de la fase de alimentación-reacción anaerobia es de 1/3 del ciclo de operación.

24-El método, según la reivindicación 21, caracterizado porque la etapa de alimentación es una etapa de alimentación sin reacción.

15 25-El método, según la reivindicación 24, caracterizado porque la duración de la fase de alimentación sin reacción tiene una duración preferente de entre 5 minutos y 30 minutos.

26-El método, según las reivindicaciones 21 a 25, caracterizado porque elimina carbono orgánico y/o nitrógeno del efluente.

20 27-El método, según la reivindicación 26, caracterizado porque la eliminación de carbono orgánico (expresado como DQO) del efluente está comprendida en el rango 77% a 92%.

28-El método, según la reivindicación 26, caracterizado porque la eliminación de nitrógeno del efluente está comprendida en el rango 23 % a 43%.

29-El método, según las reivindicaciones 21 a 23, caracterizado porque además elimina fósforo.

25 30-El método, según la reivindicación 29, caracterizado porque la eliminación de fósforo del efluente retirado está comprendida en el rango 89% a 100%.

31-El método, según la reivindicación 21 caracterizado porque en la fase aerobia con aeración pulsante se emiten pulsos de aire con una velocidad ascensional comprendida en el rango 1.2 – 3.6 cm/s.

- 32-El método, según la reivindicación 31, caracterizado porque la velocidad ascensional de aire preferente es de 3.6 cm/s.
- 5 33-El método, según la reivindicación 21, caracterizado porque en la fase aerobia con aeración pulsante se emiten pulsos de aire con una periodicidad comprendida en el rango 2,5 s – 11,5 s.
- 34-El método, según la reivindicación 21 y 33, caracterizado porque en los pulsos de aire emitidos en la fase aerobia con aeración pulsante tienen una duración comprendida en el rango 0,5 s a 1,5 s.
- 10 35-El método, según la reivindicación 34, caracterizado porque en la fase aerobia con aeración pulsante se bloquea la emisión de pulsos de aire durante un período de tiempo comprendido en el rango 2 s a 10 s.
- 36-El método, según las reivindicaciones 21 y 33, caracterizado porque la duración preferente de los pulsos de aire emitidos en la fase aerobia con aeración pulsante es de 1 s.
- 15 37-El método, según la reivindicación 36, caracterizado porque en la fase aerobia con aeración pulsante el bloqueo de pulsos de aire tiene una duración preferente de 2 s.
- 38-El método, según la reivindicación 21, caracterizado porque el índice volumétrico de lodos medido a los 5 minutos (IVL₅) está comprendido en el rango 40 a 60 m/g SST.
- 20 39-El método, según la reivindicación 21, caracterizado porque el diámetro de partícula de la biomasa granular en el reactor está comprendido en el rango 1 a 3 mm.
- 40-Uso del sistema, según las reivindicaciones 1 a 20, y del método según las reivindicaciones 21 a 39, para la eliminación de fósforo, carbono orgánico y/o nitrógeno en aguas residuales urbanas o industriales.

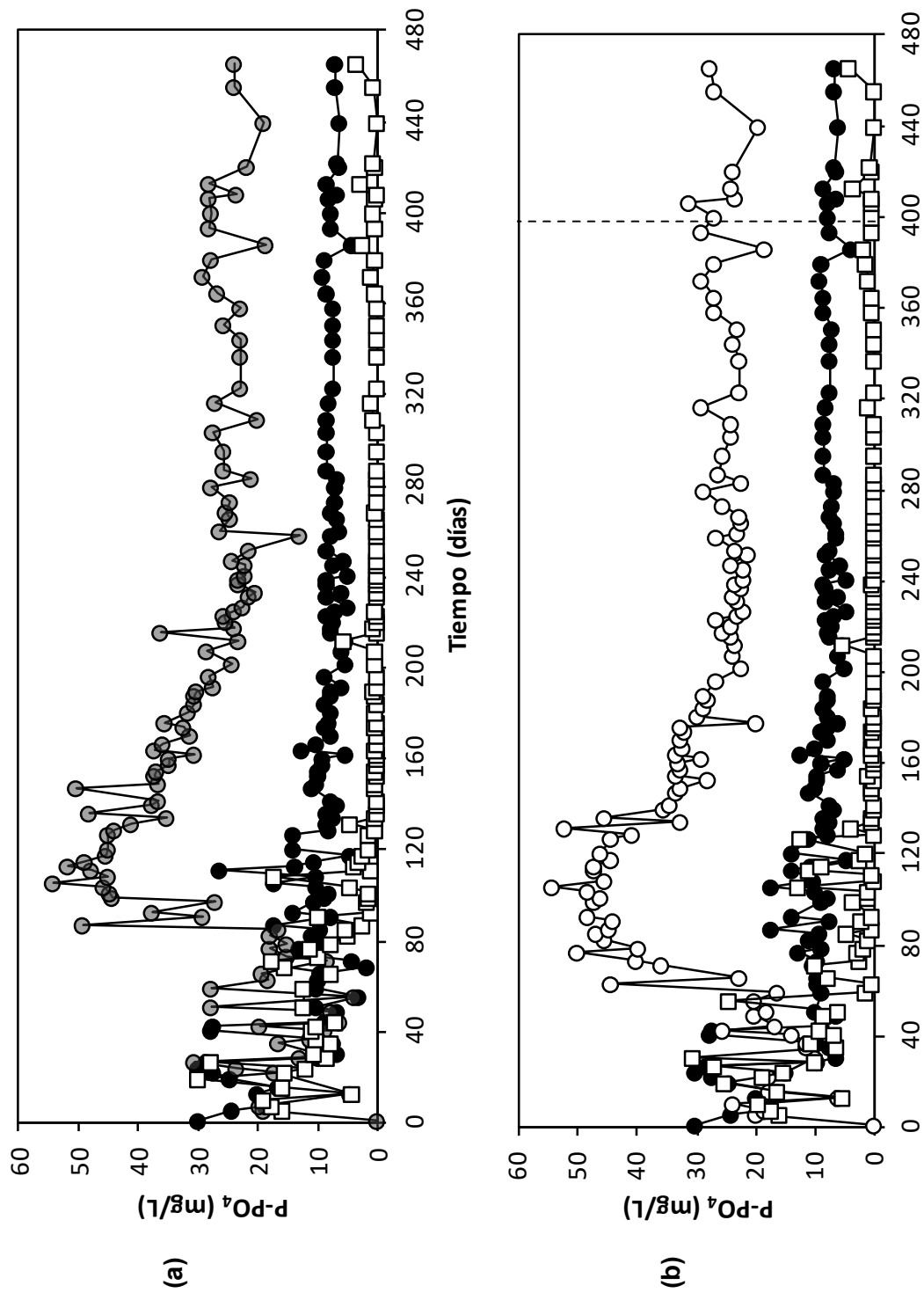


FIGURA 1

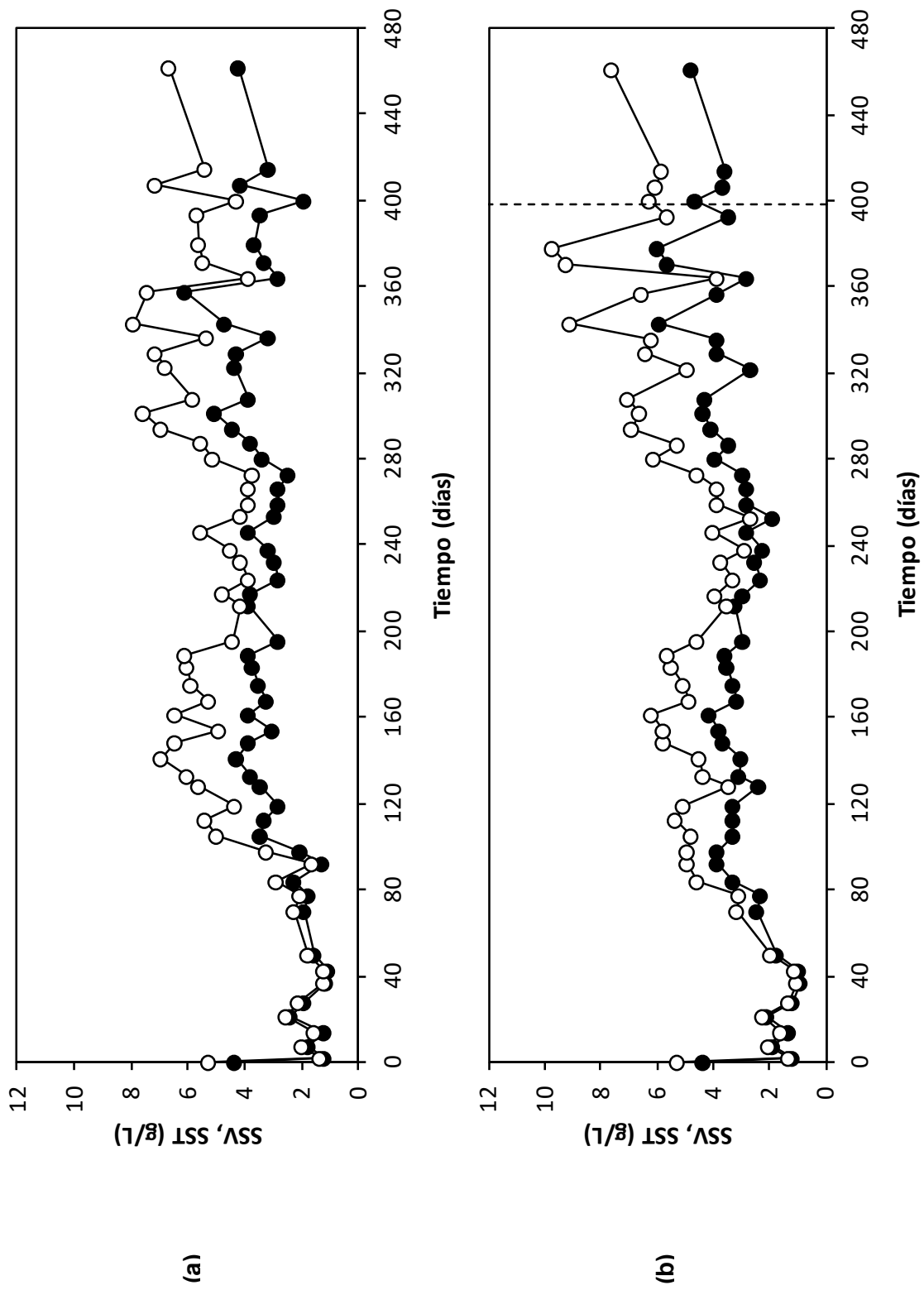


FIGURA 2

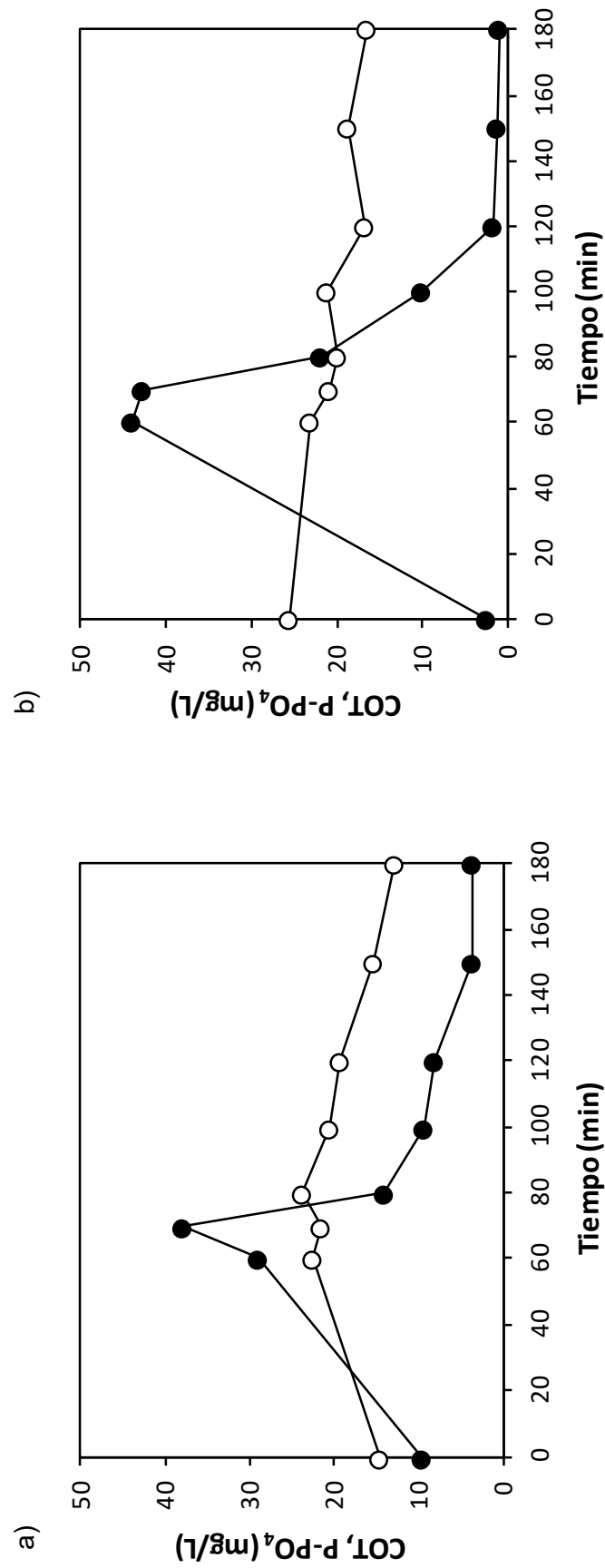


FIGURA 3

