

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 966 507**

51 Int. Cl.:

C02F 3/30 (2013.01)
C02F 3/28 (2013.01)
C02F 3/34 (2013.01)
C02F 3/00 (2013.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.06.2016** **E 16382266 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.08.2023** **EP 3255016**

54 Título: **Método para iniciar y controlar un proceso biológico para la eliminación de amonio a bajas concentraciones de amonio y baja temperatura mediante el uso de un proceso de eliminación de nitrógeno autótrofo de dos etapas**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
22.04.2024

73 Titular/es:

FCC AQUALIA, S.A. (50.0%)
Avenida Camino de Santiago 40, Edificio 3- 4ª
planta
28050 Madrid, ES y
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE
COMPOSTELA (50.0%)

72 Inventor/es:

VAL DEL RIO, MARÍA ANGELES;
PEDROUSO FUENTES, ALBA;
MOSQUERA CORRAL, ANUSKA;
CAMPOS GÓMEZ, JOSE LUIS;
MÉNDEZ PAMPÍN, RAMÓN;
MORALES PEREIRA, NICOLÁS;
VÁZQUEZ PADÍN, JOSE RAMÓN y
ROGALLA, FRANK

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 966 507 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método para iniciar y controlar un proceso biológico para la eliminación de amonio a bajas concentraciones de amonio y baja temperatura mediante el uso de un proceso de eliminación de nitrógeno autótrofo de dos etapas

Campo de la invención

La presente invención se refiere a un método para poner en marcha y controlar un proceso biológico de eliminación de amonio de aguas residuales con una concentración baja de amonio (≤ 110 mg N/L) y una temperatura baja/moderada (5-25 °C).

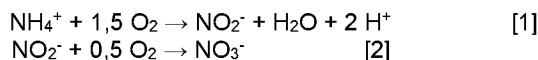
Estado de la técnica

La eliminación de nutrientes (principalmente nitrógeno, N y fósforo, P) de las aguas residuales es necesaria para evitar la eutrofización de las aguas receptoras y otros efectos nocivos. El vertido de aguas residuales que contienen nitrógeno está limitado por la Directiva Europea sobre aguas residuales urbanas y, por lo tanto, su eliminación debe llevarse a cabo en Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR). La eliminación de materia orgánica y nutrientes en los reactores de lodos activados convencionales en EDAR es intensa en la demanda de energía, y produce lodos y gases de efecto invernadero. La aplicación de procesos biológicos alternativos puede reducir los requerimientos energéticos de las EDAR y acercarlos a la autarquía energética, o incluso convertirse en productores netos de energía con una alta reducción de los costes operativos de las EDAR.

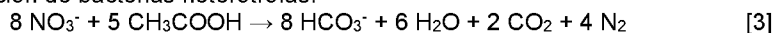
Eliminación convencional de nitrógeno

La eliminación biológica del nitrógeno presente en las aguas residuales urbanas y en la mayoría de las aguas industriales se lleva a cabo tradicionalmente a través de la combinación de los procesos biológicos de nitrificación y desnitrificación.

La nitrificación es la oxidación de amonio a nitrito o nitrato. Este proceso consiste en dos etapas; la oxidación del nitrógeno amoniacal a nitrito (ecuación [1]), llevada a cabo por bacterias oxidantes de amonio autótrofas (AOB, por sus siglas en inglés) y la posterior oxidación del nitrito a nitrato (ecuación [2]) llevada a cabo por bacterias oxidantes de nitrito autótrofas (NOB, por sus siglas en inglés).



Durante el proceso de desnitrificación, los nitratos y nitritos formados durante el proceso de nitrificación se reducen a gas nitrógeno en condiciones anóxicas, consumiendo la materia orgánica (ecuaciones [3]). Este proceso se lleva a cabo mediante la desnitrificación de bacterias heterótrofas:

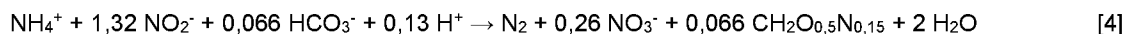


Las unidades de lodos activados convencionales pueden diseñarse para eliminar nitrógeno mediante la asimilación y la nitrificación/desnitrificación cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- una larga edad de los lodos para mantener las bacterias nitrificantes (aproximadamente 10 días a temperaturas de 15 °C);
- una tasa de consumo de oxigenación de 4,7 kg O₂/kg N;
- una relación de Demanda Química de Oxígeno (DQO) biodegradable a Nitrógeno (DQO/N) superior a 5 kg/kg. Si esta relación es inferior a 5, es necesario añadir una fuente de carbono externa, lo que hace que la operación sea más costosa.

Procesos basados en Anammox

El proceso anaeróbico de oxidación de amonio (Anammox) es llevado a cabo por un grupo de bacterias autótrofas capaces de oxidar el amonio a gas nitrógeno utilizando nitrito como aceptor de electrones (ecuación [4]), sin necesidad de suministrar oxígeno o materia orgánica:



Las bacterias Anammox pertenecen al filo Planctomycetes, y su temperatura óptima y pH son 35 °C y 8,0, respectivamente. La productividad de estas bacterias es baja, tienen una tasa de crecimiento lenta y su tiempo de duplicación es alto (10 días a 35 °C). Por lo tanto, es necesario que el proceso sea operado en reactores que tengan buena capacidad de retención de biomasa.

Combinación de los procesos de Nitritación Parcial (NP) y Anammox

La combinación de la Nitritación Parcial (NP) y el proceso de oxidación anaeróbica de amonio (Anammox) en el tratamiento

de aguas residuales es bien conocida en la técnica.

Jubany, Irene et al., en el artículo "Start-up of a nitrification system with automatic control to treat highly concentrated ammonium wastewater: Experimental results and modeling" (Chemical Engineering Journal, 2008, vol. 144, no 3, p. 407-419) describen la puesta en marcha de un sistema de nitrificación biológica para tratar aguas residuales de amonio de alta resistencia con control automático de un sistema de nitrificación completo en una planta piloto. En primer lugar, se realizó una puesta en marcha manual con aumentos manuales en la tasa de carga de nitrógeno (NLR). En segundo lugar, dos estrategias de control para la puesta en marcha controlada basadas en mediciones de la tasa de absorción de oxígeno (OUR) se implementaron con éxito y se compararon en la planta piloto. El enriquecimiento exitoso de la comunidad microbiana con microorganismos nitrificantes fue corroborado con la cuantificación de hibridación fluorescente *in situ* (FISH). Finalmente, se simuló los resultados de ambas estrategias de puesta en marcha controladas con un modelo matemático considerando la nitrificación como un proceso de dos pasos.

Flux, Christian et al., en el artículo "Biological treatment of ammonium-rich wastewater by partial nitrification and subsequent anaerobic ammonium oxidation (anammox) in a pilot plant" (Journal of biotechnology, 2002, vol. 99, no 3, p. 295-306) describe la combinación de NP para producir nitrito en un primer paso y Anammox subsecuente en un segundo reactor. El documento se centra en la viabilidad de la eliminación de nitrógeno de los efluentes del digestor de dos estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) diferentes con el proceso combinado de nitrificación parcial/Anammox.

En el proceso de NP el AOB oxida el contenido de amoníaco de las aguas residuales a nitrito, según la ecuación [1]. Con el fin de obtener un agua residual adecuada para el posterior proceso de Anammox, el proceso de NP tiene que oxidar alrededor de la mitad del contenido de amoníaco de las aguas residuales en nitrito, mientras que las bacterias Anammox utilizan el amoníaco restante y el nitrito para producir el gas de nitrógeno inofensivo, siguiendo la ecuación [4]. La supresión exitosa de NOB es una condición previa para la implementación de este sistema combinado.

Esta combinación implica algunas ventajas en el funcionamiento de las EDAR como:

- No se necesita materia orgánica para la eliminación de nitrógeno;
- La materia orgánica puede ser eliminada principalmente por la digestión anaeróbica aumentando la producción de metano en el proceso de digestión anaeróbica de la EDAR;
- Se reducen las necesidades de energía de aireación;
- También se reduce la producción de lodos en la unidad de eliminación de nitrógeno;
- Así como las emisiones de gas N_2O que se reducen, debido al hecho de que los procesos basados en Anammox convierten menos nitrógeno tratado en N_2O en comparación con los procesos convencionales de nitrificación-desnitrificación. Esto es una ventaja, ya que el N_2O es un gas con un poderoso efecto invernadero.

La combinación de procesos de NP y Anammox se utiliza típicamente para el tratamiento de aguas residuales con una alta concentración de amonio (más de 200 mg N/L) a temperaturas mesofílicas (25-40 °C), tal como el drenaje del sistema de deshidratación de lodos digeridos en una EDAR urbana (conocida como corriente lateral), que puede representar alrededor del 20 % de la carga total de entrada de nitrógeno.

La extensión de la aplicación de la combinación de procesos de NP y Anammox a temperaturas más bajas, es decir, por debajo de 25 °C, y a corrientes de concentración de amoníaco más bajas, es decir, ≤ 110 mg N/L, permitiría la aplicación de estos procesos a las aguas residuales domésticas, la corriente principal de una EDAR urbana, que se caracteriza típicamente por tales temperaturas y concentraciones más bajas. En consecuencia, se espera que la extensión de la aplicación de esta combinación de procesos (NP + Anammox) al 80 % restante del flujo de aguas residuales en una EDAR urbana mejore la eficiencia general de las EDAR, en términos de eliminación de nitrógeno, eficiencia energética y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). A este respecto, los autores Dosta, J., et al., en el artículo "Short- and long-term effects of temperature on the Anammox process" (Journal of Hazardous Materials, 2008, 154 (1-3), 688-693) ya estudiaron la viabilidad de la aplicación del proceso Anammox a temperaturas inferiores a 30 °C. (es decir, la temperatura óptima para operar el proceso). La adaptación de la biomasa a bajas temperaturas se observó cuando la biomasa fue sometida gradualmente a temperaturas más bajas. El sistema funcionó con éxito a 18 °C, pero cuando la temperatura disminuyó a 15 °C, el nitrito comenzó a acumularse y el sistema perdió su estabilidad.

Sin embargo, algunos inconvenientes han ralentizado la aplicación de los procesos basados en Anammox a aguas residuales que se caracterizan por bajas cargas de amoníaco y bajas temperaturas. En estas condiciones, la tasa de crecimiento de los organismos autótrofos implícitos es baja. Además, uno de los principales inconvenientes es el crecimiento de las bacterias oxidantes de nitrito (NOB) indeseables, que compite con las AOB por el oxígeno y con las bacterias Anammox por el nitrito. La actividad de las NOB reduce la eficiencia general de eliminación de nitrógeno, ya que estas bacterias consumen el nitrito y producen nitrato que debe eliminarse a través de otros procesos. En vista del alto costo de la eliminación biológica de nutrientes para cumplir con límites cada vez más estrictos, la eliminación de nitrógeno a través de la supresión de NOB es un tema de interés.

Diferentes estrategias han sido propuestas por diferentes autores con el objetivo de seleccionar las NOB y/o favorecer la selección de AOB y Anammox. Este objetivo se ha logrado con éxito en condiciones de ausencia, caracterizadas por altas temperaturas y altas concentraciones de amoníaco, principalmente a través de los siguientes mecanismos: la mayor tasa

- de crecimiento de las AOB que la de las NOB a altas temperaturas; la mayor inhibición por Amoníaco Libre (FA, por sus siglas en inglés) y/o Ácido Nitroso Libre (FNA, por sus siglas en inglés) para las NOB que para las AOB y la mayor afinidad por el Oxígeno Disuelto (DO, por sus siglas en inglés) para las AOB que para las NOB. Sin embargo, en condiciones convencionales, es decir, a bajas temperaturas y bajas concentraciones de nitrógeno, estos mecanismos son insignificantes o actúan en sentido opuesto, favoreciendo la actividad de NOB. El control de la supresión de NOB en corrientes de desechos de baja resistencia, tales como las aguas residuales domésticas, sigue siendo un desafío. La continua represión de las bacterias NOB es un factor clave para lograr altas eficiencias de eliminación de nitrógeno en condiciones convencionales.
- Los autores Hu, Z. et al., en el artículo "Nitrogen removal by a nitrification- anammox bioreactor at low temperature" (Applied and Environmental Microbiology, 2013, 79(8), 2807-2812) describen que la implementación de la tecnología basada en biorreactores de Nitrificación-Anammox diseñados para tratar aguas residuales con altas concentraciones de amonio a temperaturas mesofílicas (25 a 40 °C) podría conducir a una tecnología más sostenible con ahorro de energía y costes. Sin embargo, también reconocieron que la aplicación de biorreactores de Nitrificación-Anammox a temperaturas más bajas (características de las aguas residuales municipales, excepto en las regiones tropicales y subtropicales) aún no se había explorado. Para este fin, se adaptó un reactor de Nitrificación-Anammox a escala de laboratorio (5 litros) de 25 °C a 12 °C en 10 días, y de 550 a 70 mg NH_4^+ -N/L en 200 días, operado durante 132 días en condiciones de baja concentración de amonio y baja temperatura para investigar la viabilidad de la eliminación de nitrógeno mediante la combinación de bacterias oxidantes de amonio (AOB) aeróbicas y Anammox. Las actividades de Anammox y AOB fueron lo suficientemente altas como para eliminar más del 90 % del nitrógeno suministrado. Sin embargo, la tasa de eliminación de nitrógeno alcanzada fue muy baja (0,023 g N/L d), probablemente limitada por el uso de una configuración de una sola etapa. Una de las ventajas de la presente invención es que se basa en una configuración de dos etapas, lo que permite aumentar la carga tratada.
- WO2016/046330A1 describe el proceso de conversión de amonio (NH_4^+) de una corriente principal de una planta de aguas residuales a gas dinitrógeno (N_2), incluyendo los pasos consecutivos de i) eliminar compuestos de carbono biodegradables en la corriente principal, ii) convertir amonio (NH_4^+) en la corriente principal en nitrito (NO_2^-) en un proceso biológico aireado que contenga bacterias oxidantes de amonio (AOB) en un recipiente de nitración; y iii) desnitrificar la corriente resultante del paso ii) al gas dinitrógeno en un recipiente Anammox.
- WO2015/052279A1 describe un método para la eliminación de nitrógeno en aguas residuales que consiste en realizar una nitrificación parcial de aguas residuales en un reactor de biopelícula mediante un control de circuito cerrado para regular la concentración de amonio dentro del reactor de biopelícula o en el efluente de dicho reactor. El documento propone un complejo bucle de control basado en la concentración de amonio, el sustrato para la reacción de nitrificación, en el reactor y no se basa en el FNA, de hecho, en los ejemplos mostrados la concentración de FNA es insignificante debido a los altos valores de pH. El método se propone sólo para lodos de biopelícula y el porcentaje de amonio oxidado es inferior al 50 %.
- Además, en WO2015/052279A1 el licor de flujo lateral se suplementa a la unidad de nitrificación principal para tener una mayor concentración de nitrógeno en la alimentación y garantizar su rendimiento.
- También Isanta, E., et al., estudiaron en el artículo "Stable partial nitrification for low-strength wastewater at low temperature in an aerobic granular reactor" (Water Research, 2015, 80(0), 149-158), un proceso de nitrificación parcial para aguas residuales de baja resistencia a baja temperatura llevado a cabo en un reactor granular aeróbico. Se operó un biorreactor de lodos granulares a escala de laboratorio en modo continuo para tratar un influente simulando un agua residual nitrogenada municipal pretratada y la temperatura disminuyó progresivamente de 30 a 12,5 °C. Las simulaciones indicaron que: (i) Las NOB sólo se reprimirían eficazmente cuando su coeficiente de saturación de oxígeno era superior al de las bacterias oxidantes de amoníaco; y (ii) se mantuvo una menor tasa específica de crecimiento de NOB en cualquier punto de la biopelícula (incluso a 12,5 °C) debido a la concentración de amonio a granel impuesta a través de la estrategia de control. En el estudio de Isanta, se utilizó el control de la relación concentración de amoníaco/oxígeno disuelto dentro del reactor para mantener la nitrificación parcial sin actividad de NOB. Sin embargo, cuando un problema operativo provocó el aumento de la concentración de oxígeno (como un ejemplo debido a la falta de alimentación), el agotamiento del amonio potenció inmediatamente la producción de nitratos (actividad NOB) durante los períodos accidentales. Además, el control en el estudio de Isanta se basa en el uso de un pH relativamente alto, con el fin de favorecer la inhibición de NOB por FA, utilizando una concentración de amoníaco relativamente alta en el líquido a granel y, en consecuencia, también en el efluente. Sin embargo, la oxidación del amoníaco consume alcalinidad y disminuye el pH. Por lo tanto, el proceso está operando de la manera opuesta al sistema de control. Sin embargo, la presente invención se basa, no sólo en la supresión, sino también en la eliminación de NOB desde el interior del reactor. Por lo tanto, en la presente invención cuando las condiciones para el desarrollo de NOB se imponen accidentalmente dentro del reactor, estas bacterias necesitan aproximadamente 60 días para tener una actividad significativa. Además, la inhibición basada en la acumulación de FNA propuesta en la presente invención, se ve favorecida por la disminución del pH causada por la oxidación del amoníaco. Además, Isanta et al. describieron que el género principal de NOB a todas las temperaturas era *Nitrobacter*, el cual tiene una baja afinidad por las concentraciones bajas del sustrato. Sin embargo, uno de los retos de la presente invención fue lograr la supresión efectiva de *Nitrospirae*, un tipo de NOB con preferencia por bajas concentraciones, que no son tan fácilmente suprimidas en condiciones de baja concentración como el *Nitrobacter*.

Además, Lotti, T., et al., en "Anammox Growth on pretreated municipal wastewater" (Environmental Science & Technology, 2014 48(14), 7874-7880) se informó de la evaluación del proceso Anammox en un reactor a escala de laboratorio de lecho fluidizado granular alimentado continuamente con el efluente real de la etapa A (eliminación de materia orgánica) de la EDAR de Dokhaven, Rotterdam. En particular, se demostraron pruebas de crecimiento de las bacterias Anammox en condiciones convencionales para todo el rango de temperatura probado (10-20 °C), y se demostró que se formaron activamente nuevos gránulos y se retuvieron de manera eficiente en el sistema.

También podemos citar algunos documentos de patentes que se refieren a invenciones relacionadas con la tecnología de eliminación biológica de nitrógeno de aguas residuales: la Patente Europea EP-2740713 se refiere a un método para iniciar y controlar un proceso biológico para eliminar el nitrógeno contenido en las aguas residuales a través de una etapa combinada de nitrificación y oxidación anaeróbica de iones de amonio (Anammox). Sin embargo, contrariamente a la presente invención, la reacción aeróbica de la nitrificación parcial y la reacción anóxica con bacterias desnitrificantes autótrofas de amonio y nitrito tienen lugar al mismo tiempo en el mismo reactor. Además, la invención, tal como se divulga en EP-2740713, no es adecuada para tratar la corriente principal de una planta de tratamiento de aguas residuales urbana.

US-2014069864 divulga una invención que se refiere a uno o más reactores, y uno o más métodos de control para la eliminación de nitrógeno en el tratamiento de aguas residuales. El objetivo de la invención es mantener altas tasas de oxidación de bacterias oxidantes de amoníaco (AOB), al tiempo que se logra la selección de bacterias oxidantes de nitrito (NOB), utilizando varias estrategias de control, que incluyen: (1) amoníaco y el uso de puntos de control de amoníaco; (2) DO operacional y el uso de puntos de control de DO; (3) bioaumento de Anammox y fracción de AOB floculente más ligera; y (4) implementación de anoxia transitoria en varias configuraciones de reactores y condiciones para la eliminación de nitrógeno oxidado utilizando Anammox u organismos heterótrofos.

Además, US-2014263041 también divulga un reactor y un método de control para maximizar la eliminación de nitrógeno y minimizar los requisitos de aireación a través del control de la anoxia transitoria y los períodos aeróbicos, la represión de NOB, y control de las concentraciones dinámicas de DO o el intervalo de aireación manteniendo el reactor NH_4 y las concentraciones de NOx aproximadamente iguales. Se proporcionan controles haciendo uso de: (1) medición en tiempo real de amoníaco, nitrito, nitrato; (2) operación de DO y uso adecuado de puntos de control de DO, y (3) aplicación adecuada de anoxia transitoria dentro de una amplia gama de configuraciones de reactores y condiciones de funcionamiento.

El proceso de eliminación de nitrógeno propuesto por US-2014069864 y US-2014263041 se lleva a cabo mediante una configuración de una etapa para realizar simultáneamente los procesos de Nitrificación Parcial y Anammox, con un complejo sistema de control basado en la medición a través de sondas de amoníaco, nitrito y nitrato para evitar el desarrollo de NOB. Aunque algunas reivindicaciones incluyen la posibilidad de realizar ambos procesos por separado, esta posibilidad no es el núcleo de las propuestas. Además, hoy en día las sondas desarrolladas para la medición de amoníaco, nitrito y nitrato tienen diferentes problemas de estabilidad asociados a ellas, lo que complica un buen control del proceso basado en su medición. Por el contrario, la invención propuesta en este documento se basa en el uso de una configuración de dos etapas para separar el proceso de nitrificación y Anammox con el fin de tener un control más simple para la supresión de NOB basado en concentraciones de ácido nitroso libre inhibitorio.

Por último, la invención divulgada en CA-2909403 se refiere a un proceso para la eliminación biológica de nitrógeno de las aguas residuales, que comprende: (1) suministrar una corriente de aguas residuales que contienen amonio; (2) suministrar continuamente la corriente de aguas residuales a un reactor que contiene lodos granulares con gránulos que tienen un núcleo de bacterias Anammox y un borde exterior de bacterias oxidantes de amoníaco; (3) someter las aguas residuales del reactor a oxidación de amonio en condiciones de oxidación de amonio que comprendan una temperatura en el rango de 5 a 25 °C, una concentración de oxígeno disuelto en las aguas residuales en el rango de 0,4 mg/L a 4,0 mg/L, y un tiempo de retención hidráulica de las aguas residuales en el reactor en el rango de 0,5 horas a 1,5 días, obtener una corriente gaseosa que comprenda nitrógeno y una dispersión de lodos granulares y lodos no granulares en las aguas residuales tratadas. Contrariamente a la presente invención, tanto las bacterias Anammox como las bacterias oxidantes de amoníaco se encuentran en el mismo reactor.

La presente invención se propone como una solución ventajosa para resolver los problemas detectados en el campo relacionados con la eliminación de nitrógeno de las aguas residuales mediante procesos biológicos autótrofos, principalmente:

- dificultades para lograr la supresión de NOB para realizar la nitrificación a bajo amoníaco y/o baja temperatura; y
- lograr un crecimiento y actividad adecuados de las bacterias AOB y Anammox a bajo amoníaco y/o baja temperatura.

Además, la estrategia propuesta en la presente invención ofrece la ventaja de ser una disolución más sencilla que las invenciones divulgadas en el estado de la técnica.

Breve descripción de la invención

Es un primer objeto de la invención un método para iniciar y controlar un proceso autótrofo biológico para eliminar el nitrógeno contenido en una corriente de aguas residuales a una temperatura entre 5 y 25 °C, y que comprende una concentración de amonio igual o inferior a 110 mg N/L que se caracteriza porque comprende una combinación de al menos las dos etapas siguientes, realizadas en unidades separadas:

- 5 - una primera etapa en donde la corriente de aguas residuales se suministra a por lo menos un reactor de nitrificación parcial que transforma el amonio en nitrito en presencia de bacterias oxidantes de amoníaco (AOB) y oxígeno, mientras que al mismo tiempo se acumula ácido nitroso libre (FNA), en donde la concentración de FNA está entre 0,02 y 0,4 mg N/L dentro del reactor de nitrificación parcial, en donde el reactor de nitrificación parcial contiene biomasa con actividad de bacterias oxidantes de nitrito (NOB) y la puesta en marcha del reactor de nitrificación parcial comprende la adición en el reactor de nitrificación parcial al inicio del proceso de nitrificación parcial de un inhibidor de NOB, intermedio metabólico nitrogenado y/o
- 10 sustancia tóxica sobre la actividad de las NOB seleccionado de un grupo que consiste en nitrourea ($\text{CH}_3\text{N}_3\text{O}_3$), hidroxilamina (H_2NO), azida de sodio (NaN_3), cloruro de sodio (NaCl), hidracina (N_2H_4) y clorato de potasio (KClO_3), y cualquier combinación de los mismos; y
- 15 - una segunda etapa en donde un efluente controlado que sale del reactor de nitrificación parcial y contiene una relación amonio/nitrito de 0,7 a 1,0 g N/ g N se introduce en al menos un reactor anóxico con un tiempo de retención de sólidos de al menos 60 días, en donde tiene lugar un proceso Anammox que transforma el amonio y el nitrito en nitrógeno gaseoso mediante una reacción anóxica llevada a cabo por bacterias desnitrificantes autótrofas pertenecientes al filo Planctomycetes.

- 20 La concentración de FNA entre 0,02 y 0,4 mg N/L tiene una actividad de supresión de NOB (Vadivelu, V.M., et al., 2006, "The inhibitory effects of free nitrous acid on the energy generation and growth processes of an enriched Nitrobacter culture", Environmental Science & Technology, 40(14), 4442-4448). Cabe señalar que la concentración final de FNA está influenciada principalmente por el valor de pH dentro del reactor de nitrificación, además de otros factores, tal como la temperatura o la concentración de nitrito (Anthonisen, A.C., et al., 1976, "Inhibition of Nitrification by Ammonia and Nitrous Acid", Journal Water Pollution Control Federation, 48(5), 835-852). Sin embargo, la influencia de la temperatura y la
- 25 concentración de nitritos no es significativa en comparación con la influencia del pH, dicha baja influencia se demuestra por sus bajos rangos de fluctuación bajo condiciones convencionales. Resumiendo, una vez que el nitrito se acumula (en una relación amonio-nitrito ($\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_2\text{-N}$ de 0,7-1,0), la concentración de FNA requerida para suprimir la actividad de las bacterias oxidantes de nitrito (NOB) está entre 0,02 y 0,4 mg N/L.

- 30 El proceso permite diferentes configuraciones, siempre que haya una primera etapa de nitrificación y una segunda etapa correspondiente al proceso Anammox. Por lo tanto, se puede utilizar más de un reactor para llevar a cabo cada una de las dos etapas, trabajando en paralelo o en serie.

- 35 En otro aspecto, cuando la relación amonio-nitrito en el efluente del reactor de nitrificación parcial es de 0,7 a 1,0 g N/ g N, el efluente total que sale del reactor de nitrificación parcial pasa del reactor de nitrificación parcial al reactor anóxico.

- En otro aspecto, cuando la relación amonio-nitrito en el efluente del reactor de nitrificación es inferior a 0,7 g N/ g N, una fracción del 1 % al 50 % de la corriente de aguas residuales se pasa directamente al menos un reactor anóxico Anammox en donde se mezcla con el efluente del reactor de nitrificación, lo que da como resultado una mezcla con una relación amonio-nitrito de 0,7 a 1,0 g N/ g N.
- 40

- Para mantener la adecuada relación amoníaco-nitrito en el efluente del reactor de nitrificación parcial para el posterior proceso de Anammox, es posible controlar la concentración de oxígeno disuelto (DO), que debe mantenerse entre 0,1 y 8,0 mg O_2 /L.
- 45

Las AOB, y/o las bacterias Anammox pueden estar dentro o dispuestas en una biopelícula, ya sea en forma de gránulos o unidas a un material de apoyo dentro del reactor.

- 50 En una realización preferida, la bacteria oxidante del amoníaco procede de un reactor de nitrificación parcial en condiciones de reborde lateral, dichas condiciones son una temperatura superior a 25 °C y una concentración de amonio superior a 110 mg N/L

- En otro aspecto, el método de la presente invención comprende un paso más de regeneración de las bacterias oxidantes de amoníaco (AOB) dentro del reactor de nitrificación parcial mediante el intercambio de un porcentaje entre el 5 y el 50 % en peso de dichas bacterias por uno nuevo procedente de al menos un segundo reactor de nitrificación parcial operado a alta concentración de amonio, por encima de 110 mg N/L, y alta temperatura, por encima de 25 °C, con una periodicidad entre 20 y 365 días.
- 55

- En otro aspecto, el método de la presente invención comprende un paso más de regeneración de las bacterias desnitrificantes autótrofas dentro del reactor anóxico mediante el intercambio de un porcentaje entre el 5 y el 50 % en peso de dichas bacterias por uno nuevo procedente de al menos un segundo reactor anóxico operado a alta concentración de amonio, por encima de 110 mg N/L, y alta temperatura, por encima de 25 °C, con una periodicidad entre 20 y 365 días.
- 60

- Por medio de dicho proceso Anammox, el amonio y el nitrito son eliminados por bacterias desnitrificantes autótrofas de los filos Planctomycetes que se cultivan y retienen selectivamente dentro del reactor. Este proceso de Anammox es
- 65

controlado por: (1) una relación adecuada de amoníaco/nitrito procedente del reactor de nitrificación parcial anterior; y (2) un equilibrio adecuado entre el crecimiento en condiciones normales y el lavado de biomasa, manteniendo una buena retención de biomasa y altos valores del tiempo de retención de sólidos (SRT, por sus siglas en inglés, de al menos 60 días).

De acuerdo con la presente invención, la supresión de NOB se basa en el uso de concentraciones inhibitorias de FNA (entre 0,02 y 0,4 mg N/L). A lo largo del proceso, dichas bacterias NOB se eliminan selectivamente del reactor mientras se retienen las AOB, lo que es una ventaja del proceso. En consecuencia, la oxidación no deseada de nitrito a nitrato se minimiza. La eliminación selectiva de las NOB del reactor de nitrificación parcial permite: (1) operar el proceso a una concentración de oxígeno disuelto relativamente alta (preferiblemente entre 0,1 y 8,0 mg O₂/L), lo que resulta ventajoso para la tasa de conversión en el paso de nitrificación y, en consecuencia, para conseguir una elevada tasa global de eliminación de nitrógeno, es decir, preferiblemente > 0,2 kg N/(m³d); y (2) gran estabilidad y robustez, ya que las bacterias NOB no están presentes en el interior del reactor (o lo están en una concentración mínima, de tal manera que no más del 10 % del nitrito sea oxidado a nitrato por las NOB), y serán necesarios al menos 60 días hasta que alcancen una actividad significativa dentro del reactor de nitrificación parcial. Esto da tiempo a los operadores para modificar las condiciones del reactor y llevarlos de nuevo a las condiciones inhibitorias para el crecimiento de NOB.

Además, el uso de unidades separadas para la nitrificación parcial y el proceso Anammox permite: (1) acumular FNA dentro del reactor de nitrificación parcial para inhibir las NOB, ya que las bacterias Anammox no consumen el nitrito en el mismo reactor y (2) utilizar concentraciones relativamente altas de oxígeno disuelto (DO) (como se describió anteriormente, entre 0,1 y 8,0 mg O₂/L,) sin inhibir las bacterias Anammox, lo que permite lograr una mayor actividad oxidante del amoníaco. Se evita la aplicación simultánea del proceso de nitrificación parcial y de Anammox en la misma unidad, ya que el proceso de Anammox consume el nitrito producido por las AOB y, en consecuencia, consume el inhibidor de NOB autocreado. En este sentido, la presente invención es diferente de otras invenciones del estado de la técnica, basadas en el uso de una sola etapa (o unidad) para ambos procesos.

Breve descripción de las figuras

La **Figura 1** (correspondiente a la Figura 1A y la Figura 1B) muestra una representación gráfica del perfil de FNA aplicando la ecuación propuesta por Anthonisen et al. (1976) a diferentes temperaturas: 5 °C (■), 10 °C (Δ), 15 °C (●), 20 °C (□) y 25 °C (▲):

La **Figura A** muestra una representación gráfica del rango operativo para inhibir NOB en términos de pH y concentración de nitrito para: FNA<0,02 mg N/L (arriba, zona no deseable) y FNA>0,02 mg N/L (abajo, zona deseable);

La **Figura B** muestra una representación gráfica del rango operativo para evitar la inhibición de AOB en términos de pH y concentración de nitrito para: FNA<0,4 mg N/L (arriba, zona deseable) y FNA>0,4 mg N/L (abajo, zona no deseable).

La **Figura 2** muestra una configuración de dos etapas, de acuerdo con la presente divulgación, para la eliminación de nitrógeno autótrofo en condiciones convencionales. La Unidad 1 representa el reactor de nitrificación parcial y la Unidad 2, el reactor Anammox.

La **Figura 3** muestra la evolución de los compuestos nitrogenados en el reactor del Ejemplo 2: NH₄⁺ es el influente (●) y NH₄⁺ (○), NO₂⁻ (*) y NO₃⁻ (▲) en el efluente en mg N/L.

La **Figura 4** muestra la evolución de FNA (-, en negro) en mg N/L y pH (-, en gris) en el reactor de NP del Ejemplo 2.

La **Figura 5** (correspondiente a la Figura 5A y la Figura 5B) muestra la actividad Anammox de la biomasa (en g N/g VSS.d):

La **Figura 5A** muestra los resultados de un único reactor de nitrificación parcial/Anammox durante los días de operación: 1 (●), 69 (■), 91 (◇) y 167 (▲);

La **Figura 5B** muestra los resultados del reactor Anammox para pruebas por lotes (○) y para un reactor continuo (□) (datos de Dosta, J., et al., (2008), "Short- and long-term effects of temperature on the Anammox process", Journal of Hazardous Materials, 154(1-3), 688-693).

Descripción detallada de la invención

Como se describió antes brevemente, la presente invención está relacionada con un método para iniciar y controlar un proceso autótrofo biológico para eliminar el nitrógeno contenido en las aguas residuales, en las condiciones de la línea principal de una EDAR (baja concentración de nitrógeno, igual o inferior a 110 mg N/L y temperatura baja/moderada, 5-25 °C), preferiblemente después de la eliminación de la mayor parte de la materia orgánica (mediante cualquier método convencional del estado de la técnica), mediante la aplicación de dos procesos separados 1) el proceso de nitrificación parcial, en donde se inhibe el desarrollo de las NOB, y 2) un proceso de oxidación anaeróbica del amonio (Anammox). Este método maximiza la eliminación de nitrógeno, minimiza los requisitos de aireación y mejora la autosuficiencia energética de las EDAR.

En consecuencia, una realización de la presente invención proporciona un proceso que comprende:

(a) suministrar continuamente un flujo de aguas residuales que contenga amonio en una cantidad igual o inferior a 110 mg N/L y que tenga una relación de carbono inorgánico/nitrógeno (IC/N) inferior a 5 kg IC/kg N, y más preferiblemente inferior a 2 kg IC/kg N, o una fracción de la corriente (de 50 % a 100 %) a al menos un reactor de nitrificación parcial que contiene biomasa (bacterias oxidantes de amoníaco, AOB) que realiza la oxidación aeróbica de amonio a nitrito, en condiciones oxidativas, según la ecuación [1]:

- Si las aguas residuales contienen una relación de carbono inorgánico-nitrógeno (IC/N) en el rango entre 1 y 1,25,

entonces, el flujo completo de aguas residuales se trata en el primer proceso (100 %), y la mitad del amonio se oxida a nitrito. De esta manera, el efluente del reactor de nitrificación tiene una relación de concentración de amonio a nitrito de 0,7 - 1 g N/g N;

- Si las aguas residuales contienen una relación de IC/N inferior a 1, entonces, el flujo completo de aguas residuales se trata en el primer proceso (100 %), pero se debe añadir una fuente externa de alcalinidad para lograr una relación de $\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{NO}_2^+ \text{-N}$ de 0,7 - 1 en el efluente;

- Si las aguas residuales contienen una relación de IC/N de 1,25 a 2 ($1,25 < \text{IC/N} < 2$), el flujo tratado en el reactor de nitrificación está entre el 50 y el 100 % del flujo, y la concentración de amonio oxidado a nitrito está entre el 100 y el 50 %, respectivamente;

- Si las aguas residuales contienen una relación de IC/N superior a 2, la mitad de la corriente (50 %) se trata en el reactor de nitrificación y la concentración de amonio se oxida completamente a nitrito;

b) En el segundo proceso (reactor Anammox), el amonio que no se oxidó en la unidad anterior, y el nitrito producido en el proceso de nitrificación parcial se combina para ser eliminado de las aguas residuales en forma de gas nitrógeno, a través de una reacción anóxica realizada por bacterias desnitrificantes autótrofas pertenecientes al filo Planctomycetes, según la ecuación [4].

La **Figura 2** muestra una configuración o sistema de dos etapas para llevar a cabo el método que se reivindica para poner en marcha y controlar un proceso autótrofo biológico para eliminar el nitrógeno contenido en una corriente de aguas residuales en condiciones convencionales. En particular, muestra un reactor de nitrificación parcial (1) y un reactor Anammox (2). En una realización preferida de la invención, los reactores pueden incluir medios para medir los siguientes parámetros: pH, concentración de oxígeno disuelto (DO), alcalinidad, aguas residuales y/o tasa de flujo de aire/oxígeno suministrado, etc. Dichos medios pueden consistir en sondas, equipos de medición y/o medidores de flujo. La medición de los parámetros puede registrarse a través de un sistema de control automatizado, que puede actuar sobre el tiempo de residencia hidráulica, el suministro de aire/oxígeno al reactor, la adición del inhibidor y/o el control del pH.

Reactor de Nitrificación Parcial

La Nitrificación Parcial se logra a través del logro de altas tasas de AOB y a través de la selección de NOB. En particular, el reactor de nitrificación parcial que trata aguas residuales de baja resistencia a baja temperatura puede ponerse en marcha mediante una de las siguientes estrategias.

(a) En una realización particular de la invención, en donde la biomasa del reactor tiene actividad NOB en el momento de la puesta en marcha de la operación, la puesta en marcha del reactor de nitrificación parcial comprenderá las dos etapas siguientes:

(1) añadir en el reactor de nitrificación parcial un inhibidor de NOB específico, un intermedio metabólico nitrogenado y/o una sustancia tóxica sobre la actividad de las NOB al inicio de la operación (puesta en marcha). El inhibidor específico (o combinación de inhibidores) de NOB se añadirá en un rango de concentración que inhibe las bacterias NOB sin afectar la actividad de AOB. El inhibidor, el intermedio metabólico nitrogenado y/o la sustancia tóxica, o la combinación de sustancias actúa como un "activador de acumulación de nitritos" para lograr la supresión de NOB y alcanzar la nitrificación parcial en las condiciones convencionales. La presencia de esta sustancia ("activador de acumulación de nitritos") no debe afectar negativamente la actividad de las AOB (o al menos afectarla en un nivel muy bajo). En este sentido, se podrían utilizar diferentes tipos de compuestos externos o internos, que actúan como inhibidores de NOB, intermedios metabólicos nitrogenados o sustancias tóxicas sobre la actividad de las NOB, seleccionados de un grupo que consiste en nitrourea ($\text{CH}_3\text{N}_3\text{O}_3$), hidroxilamina (H_2NO), azida de sodio (NaN_3), cloruro de sodio (NaCl), hidracina (N_2H_4) o clorato de potasio (KClO_3). Además, la adición del activador promueve la acumulación de nitrito, ya que el consumo de este compuesto por las NOB es limitado. En consecuencia, el nitrito no se oxida a nitrato. La acumulación de nitrito con un pH adecuado en el reactor de nitrificación parcial sirve para lograr concentraciones de FNA en el reactor de nitrificación parcial en un rango inhibitorio para NOB. Por lo tanto, el FNA producido actúa como el "compuesto inhibidor real", mientras que la sustancia añadida era sólo el "activador de acumulación de nitrito". El pH será el adecuado para mantener una concentración de FNA igual o superior a 0,02 mg N/L. Por lo tanto, los valores inhibitorios de FNA alcanzados con esta puesta en marcha evitan el desarrollo de NOB, y en consecuencia facilitan la acumulación y crecimiento de AOB, y facilitan la acumulación de nitrito y amoníaco en la proporción correcta. La Figura 1 muestra que el rango óptimo de FNA se logra preferiblemente con valores de pH adecuados (preferiblemente entre 5,0 y 7,5), aunque también depende de la temperatura. La relación entre la temperatura y la concentración de FNA se puede observar en la Figura 1. La concentración de FNA (para el mismo pH y concentración de nitrito) es mayor a temperaturas más bajas. De esta manera, la baja temperatura de las aguas residuales en condiciones generales favorece la estrategia de supresión de NOB basada en FNA;

(2) después de un período estable de acumulación de nitrito en el reactor de nitrificación parcial (al menos una semana), se detiene la adición del inhibidor específico externo, el intermedio metabólico nitrogenado y/o la sustancia tóxica sobre la actividad de las NOB, y se mantiene la nitrificación parcial debido al FNA acumulado. Este FNA acumulado actúa después (una vez que el inhibidor de NOB específico ya no se añade durante el funcionamiento a largo plazo del reactor) como el inhibidor de NOB real y "creado *in situ*" para el proceso. El proceso de nitrificación parcial está controlado por la concentración de FNA dentro del sistema, que debe ser superior a 0,02 mg N/L para mantener la inhibición de NOB;

(b) en una realización alternativa no comprendida en la presente invención, en donde se utiliza biomasa sin actividad NOB, no es necesario añadir el inhibidor específico, el intermedio metabólico nitrogenado y/o la sustancia tóxica. Por lo tanto, la puesta en marcha del reactor de nitrificación parcial se lleva a cabo utilizando como inóculo la biomasa (lodo nitrificante) de un reactor de nitrificación parcial en condiciones de flujo lateral (temperatura superior a 25 °C y concentración

de amonio superior a 110 mg N/L) en las que la actividad de AOB es alta y la actividad de NOB es insignificante. Debido a que el crecimiento de las NOB bajo las nuevas condiciones no es inmediato (toma al menos 60 días), la alta actividad de AOB provoca la acumulación inicial de nitritos y, por lo tanto, la acumulación de FNA. Alcanzar valores de FNA superiores a 0,02 mg N/L evita el crecimiento y desarrollo de NOB. En este caso, si la supresión de NOB no es tan eficaz como se desea, esta alternativa también podría combinarse con la primera explicada en el punto (a).

De una manera preferida, la temperatura de funcionamiento en el reactor de nitrificación parcial puede variar de 5 a 25 °C, la concentración de oxígeno disuelto (DO) en las aguas residuales puede variar de 0,1 mg O₂/L a 8,0 mg O₂/L, y el tiempo de retención hidráulica de las aguas residuales en el reactor puede variar de 4 horas a 2 días.

Además, en una realización preferida de la invención, el método puede incluir además una fase de intercambio de bacterias oxidantes de amoníaco (AOB) desde al menos un segundo reactor de nitrificación parcial operado a condiciones de amoníaco alto (> 110 mg N/L) y de alta temperatura (> 25 °C), es decir, en condiciones de paso lateral, con el fin de refrescar la biomasa de nitrificación parcial y aumentar la actividad dentro del primer reactor de nitrificación parcial en donde se lleva a cabo el método según lo reivindicado. El intercambio de biomasa se utilizará en una relación adecuada (5-50 %) y periodicidad (20-365 días) para mantener una alta tasa de eliminación.

Reactor de Anammox

Las aguas residuales tratadas en el reactor de nitrificación parcial o su mezcla con agua cruda (si sólo una parte del flujo total de aguas residuales se trata en la etapa de nitrificación parcial anterior), se transfieren a otra unidad, en donde se lleva a cabo el proceso de Anammox. Este proceso se opera en un reactor Anammox en condiciones anóxicas, con el fin de evitar el desarrollo de organismos aeróbicos (AOB o NOB) que pueden competir por el nitrito o amonio con las bacterias Anammox.

Las bacterias Anammox a baja temperatura (5-25 °C) tienen una baja tasa de crecimiento. Por lo tanto, es importante obtener una buena retención de biomasa dentro del reactor para garantizar una pérdida mínima de biomasa en el efluente y lograr una alta concentración de sólidos, preferiblemente más de 1 g de Sólido en Suspensión Volátil (VSS)/L, y más preferiblemente entre 2,0 y 20,0 g VSS/L. El tiempo de retención del lodo de biomasa Anammox dentro del reactor será de al menos 60 días, y preferiblemente entre 60 y 150 días. Este tiempo de retención puede lograrse mediante biomasa granular o biopelícula, con el fin de obtener una mejor retención de biomasa. Por lo tanto, también puede ser con o sin material de soporte externo natural o artificial. Además, se pueden utilizar membranas para filtrar el efluente y lograr una mejor calidad de efluente en combinación o además de sistemas de colonización para mejorar la separación de la biomasa de las aguas residuales.

En una realización preferida de la invención, el método comprenderá además un paso de intercambio de las bacterias anaeróbicas oxidantes de amonio (Anammox) mediante la introducción de nuevas bacterias de al menos un segundo reactor de Anammox operado en condiciones de altas concentraciones de amoníaco (> 110 mg N/L) y altas temperaturas (>25 °C) para la renovación de la biomasa Anammox y para aumentar su actividad. El intercambio de biomasa se utilizará en una relación adecuada (5-50 %) y periodicidad (20-365 días) para mantener una alta tasa de eliminación.

Ejemplos

Ejemplo 1

En un primer ejemplo se comprobó que el método de puesta en marcha y control del proceso descrito en la presente logra la nitrificación parcial a 15±1 °C y 50 mg N-NH₄⁺/L, con aguas residuales sintéticas, utilizando como inhibidor inicial azida de sodio a una concentración de 5 mg/L en la alimentación parcial del reactor de nitrificación. Después de lograr la acumulación de nitrito en el reactor de nitrificación parcial, se eliminó la adición del inhibidor de NOB. Sin embargo, la represión de NOB se mantuvo debido a la presencia de concentraciones de FNA siempre superiores a 0,02 mg N/L, debido a la acumulación de nitrito en el líquido a granel y el valor de pH.

Ejemplo 2

En este ejemplo, la puesta en marcha de un reactor de nitrificación parcial operado a escala de laboratorio se llevó a cabo siguiendo el método descrito en la presente invención. Un reactor con un volumen útil de 2 L fue operado en ciclos de 3 horas, distribuidos como: 158 min de alimentación y aireación simultáneas, 20 min de sedimentación y 2 min de retirada. El reactor se mantuvo a 17 ± 1 °C y se alimentó con aguas residuales sintéticas que contenían 50 mg NH₄⁺-N/L. El tiempo de retención hidráulica (TRH) fue de 0,29 días.

La operación se dividió en tres etapas (como se muestra en la **Figura 3**). Durante los primeros 65 días (Etapa I) la concentración de oxígeno disuelto (DO) se mantuvo por debajo de 1 mg O₂/L y la concentración de biomasa a aproximadamente 6,5 g VSS/L. Durante este período el amoníaco se oxidó completamente a nitrato, por lo que las AOB y NOB estuvieron activas y se logró la nitrificación total.

A continuación, en la Etapa II (65-210 días), y siguiendo el método descrito en la presente invención, la alimentación

sintética se complementó con 5 mg/L de azida de sodio como activador de nitrificación parcial. La adición de este compuesto inhibe la actividad de las NOB después de 55 días. En consecuencia, el nitrato se acumuló en el sistema. Alrededor del día 120, la concentración de nitrato medida en el efluente era cercana a cero.

En la Etapa III (a partir del día 210) la azida de sodio ya no se añadió al sistema. La actividad de NOB en el reactor fue insignificante a pesar de que no se añadió azida de sodio durante 174 días, gracias al efecto inhibitorio del FNA acumulado en el sistema (véase la Figura 4). Esto se debió al efecto sinérgico del nitrato acumulado en el sistema y al valor de pH, a pesar de la aplicación de concentraciones de DO, variaron de 1 a 3 mg O₂/L. Además, el tiempo de retención de sólidos (SRT) en esta etapa fue siempre superior a 75 días.

Un reactor Anammox puede tratar el efluente del reactor de nitrificación parcial con el fin de eliminar completamente de forma autótrofa el contenido de nitrógeno de las aguas residuales a través de la combinación de nitrificación parcial y procesos basados en Anammox. La adición de azida de sodio es eficaz para iniciar la inhibición de la actividad NOB (Tabla 1) y lograr la nitrificación parcial en condiciones convencionales. El FNA acumulado en este período de puesta en marcha mantiene la estabilidad de nitrificación parcial en una operación a largo plazo.

Tabla 1. Actividades de biomasa (g N/(g VSS·d)) determinadas por ensayos respirométricos a 17 °C.

Muestra	AOB	NOB
Etapa I (día 0)	0,050 ±0,006	0,072 ±0,012
Etapa II (día 203)	0,068 ±0,028	No detectada
Etapa III (día 238)	0,103 ±0,039	No detectada
Etapa III (día 288)	0,220 ±0,011	No detectada
Etapa III (días 356-367)*	0,139 ±0,011	No detectada
* Valor promedio de actividad medido dentro del reactor		

Ejemplo 3

La continua represión de las NOB aparece como un factor clave para lograr una alta eficiencia de eliminación de nitrógeno en un proceso de nitrificación parcial y Anammox operado en una sola etapa en condiciones convencionales. Se operó un reactor de nitrificación parcial y Anammox con un volumen útil de 5 L, en ciclos de 3 horas, distribuidos como: 135 min de alimentación y aireación, 15 min de mezclado mecánico, 28 min de sedimentación y 2 min de retirada.

El reactor de nitrificación parcial y Anammox se inoculó con biomasa granular de un reactor de nitrificación parcial y Anammox en condiciones de flujo lateral (alta temperatura y carga de nitrógeno) y se operó durante 186 días en condiciones convencionales (15 °C y 50-80 mg NH₄⁺-N/L). Esta experiencia reveló que no es posible llevar a cabo los procesos de nitrificación parcial y Anammox en una sola etapa bajo estas condiciones, ya que la eliminación autótrofa de nitrógeno falló debido al desarrollo de NOB, que se observó alrededor de 50-60 días después de la inoculación. Sin embargo, este resultado señala que la actividad Anammox específica medida de la biomasa total permaneció sin variaciones significativas durante la operación (como se muestra en la **Figura 5A**). El valor específico de actividad Anammox alcanzado a baja temperatura fue similar al encontrado por otros autores (Hu et al., en el artículo "Nitrogen removal by a nitrification-anammox bioreactor at low temperature" (Applied and Environmental Microbiology, 2013, 79(8), 2807-2812) y Lotti et al., en "Anammox growth on pretreated municipal wastewater" (Environmental Science & Technology, 2014 48(14), 7874-7880)) y coincidió con experimentos anteriores realizados con pruebas por lotes y con un funcionamiento continuo del reactor (como se muestra en la **Figura 5B** de los autores Dosta, J., et al., en el artículo "Short- and long-term effects of temperature on the Anammox process" (Journal of Hazardous Materials, 2008, 154 (1-3), 688-693)). Por tanto, el proceso Anammox es posible en condiciones generales a pesar de tener una actividad específica menor que en condiciones de exclusión.

REIVINDICACIONES

1. Un método para poner en marcha y controlar un proceso biológico autótrofo para eliminar el nitrógeno contenido en una corriente de aguas residuales a una temperatura comprendida entre 5 y 25 °C y que comprende una concentración de amonio igual o inferior a 110 mg N/L, caracterizado porque comprende una combinación de al menos las dos etapas siguientes realizadas en unidades separadas: una primera etapa en donde la corriente de aguas residuales se suministra a por lo menos un reactor de nitrificación parcial que transforma el amonio en nitrito en presencia de bacterias oxidantes de amoníaco (AOB) y oxígeno, mientras que al mismo tiempo se acumula ácido nitroso libre (FNA), en donde la concentración de FNA está entre 0,02 y 0,4 mg N/L dentro del reactor de nitrificación parcial, en donde el reactor de nitrificación parcial contiene biomasa con actividad de bacterias oxidantes de nitrito (NOB) y la puesta en marcha del reactor de nitrificación parcial comprende la adición en el reactor de nitrificación parcial al inicio del proceso de nitrificación parcial de un inhibidor de NOB, intermedio metabólico nitrogenado y/o sustancia tóxica sobre la actividad de las NOB seleccionado de un grupo que consiste en nitrourea ($\text{CH}_3\text{N}_3\text{O}_3$), hidroxilamina (H_2NO), azida de sodio (NaN_3), cloruro de sodio (NaCl), hidracina (N_2H_4) y clorato de potasio (KClO_3), y cualquier combinación de los mismos; y
 - una segunda etapa en donde un efluente controlado que sale del reactor de nitrificación parcial y contiene una relación amonio/nitrito de 0,7 a 1,0 g N/ g N se introduce en al menos un reactor anóxico con un tiempo de retención de sólidos de al menos 60 días, en donde tiene lugar un proceso Anammox que transforma el amonio y el nitrito en nitrógeno gaseoso mediante una reacción anóxica llevada a cabo por bacterias desnitrificantes autótrofas pertenecientes al filo Planctomycetes.
2. El método de conformidad con la reivindicación 1, en donde, cuando la relación amonio-nitrito en el efluente del reactor de nitrificación parcial es de 0,7 a 1,0 g N/ g N, el efluente total que sale del reactor de nitrificación parcial pasa del reactor de nitrificación parcial al reactor anóxico.
3. El método de conformidad con la reivindicación 1, en donde, cuando la relación amonio-nitrito en el efluente del reactor de nitrificación es inferior a 0,7 g N/ g N, una fracción del 1 % al 50 % de la corriente de aguas residuales se pasa directamente al menos un reactor anóxico Anammox en donde se mezcla con el efluente del reactor de nitrificación, lo que da como resultado una mezcla con una relación amonio-nitrito de 0,7 a 1,0 g N/ g N.
4. El método de conformidad con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en donde la etapa de nitrificación tiene lugar en una concentración de oxígeno disuelto (DO) entre 0,1 y 8,0 mg O_2 /L.
5. El método de conformidad con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en donde las bacterias oxidantes de amoníaco proceden de un reactor de nitrificación parcial en condiciones de reborde lateral, dichas condiciones son una temperatura superior a 25 °C y una concentración de amonio superior a 110 mg N/L.
6. El método de conformidad con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque comprende un paso más de regeneración de las bacterias oxidantes de amoníaco (AOB) dentro del reactor de nitrificación parcial mediante el intercambio de un porcentaje entre el 5 y el 50 % en peso de dichas bacterias por uno nuevo procedente de al menos un segundo reactor de nitrificación parcial operado a alta concentración de amonio, por encima de 110 mg N/L, y alta temperatura, por encima de 25 °C, con una periodicidad entre 20 y 365 días.
7. El método de conformidad con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en donde hay un paso más de regeneración de las bacterias desnitrificantes autótrofas dentro del reactor anóxico mediante el intercambio de un porcentaje entre el 5 y el 50 % en peso de dichas bacterias por uno nuevo procedente de al menos un segundo reactor anóxico operado a alta concentración de amonio, por encima de 110 mg N/L, y alta temperatura, por encima de 25 °C, con una periodicidad entre 20 y 365 días.

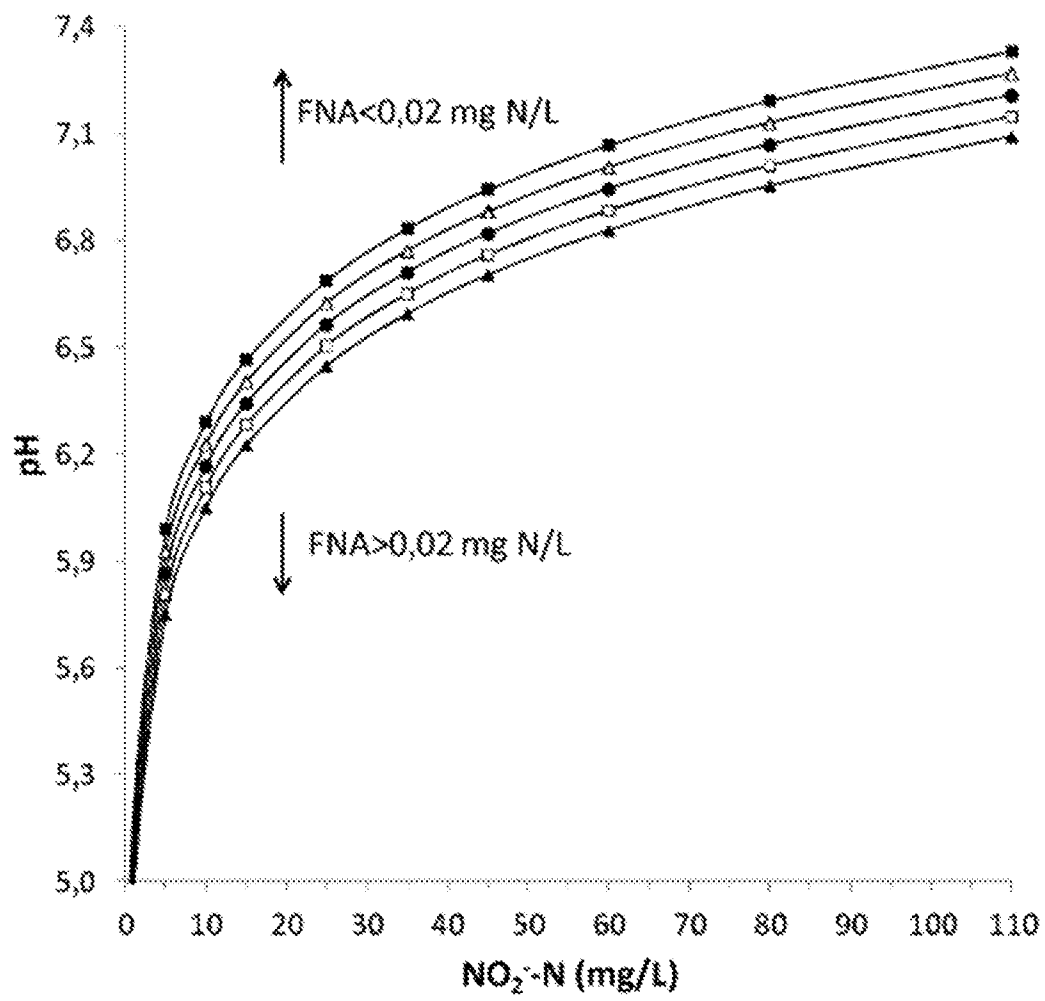


FIG. 1A

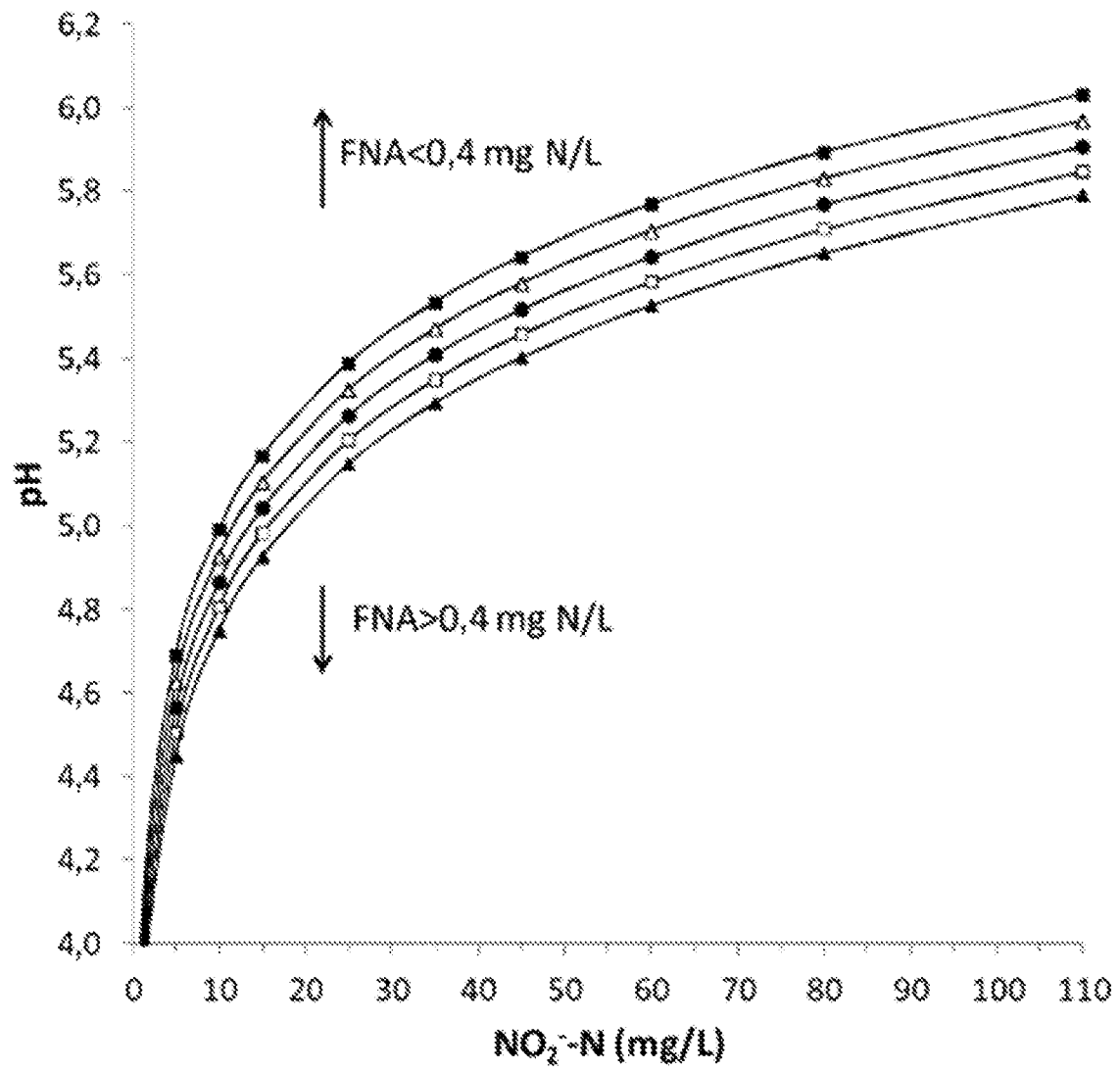


FIG. 1B

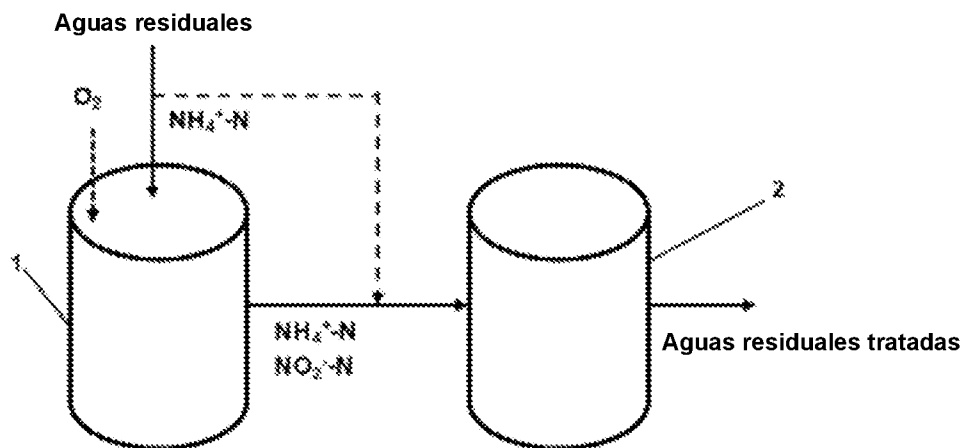


FIG. 2

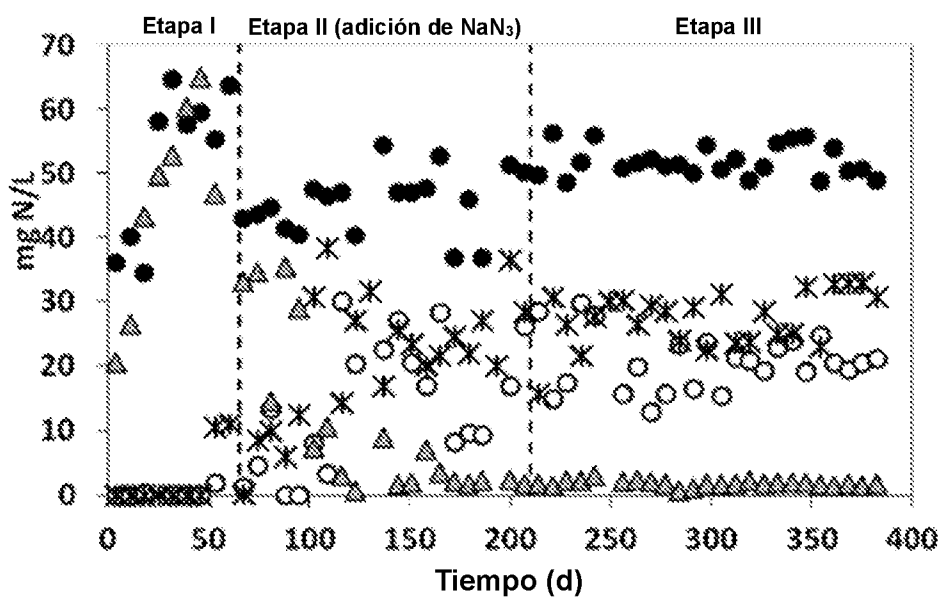


FIG. 3

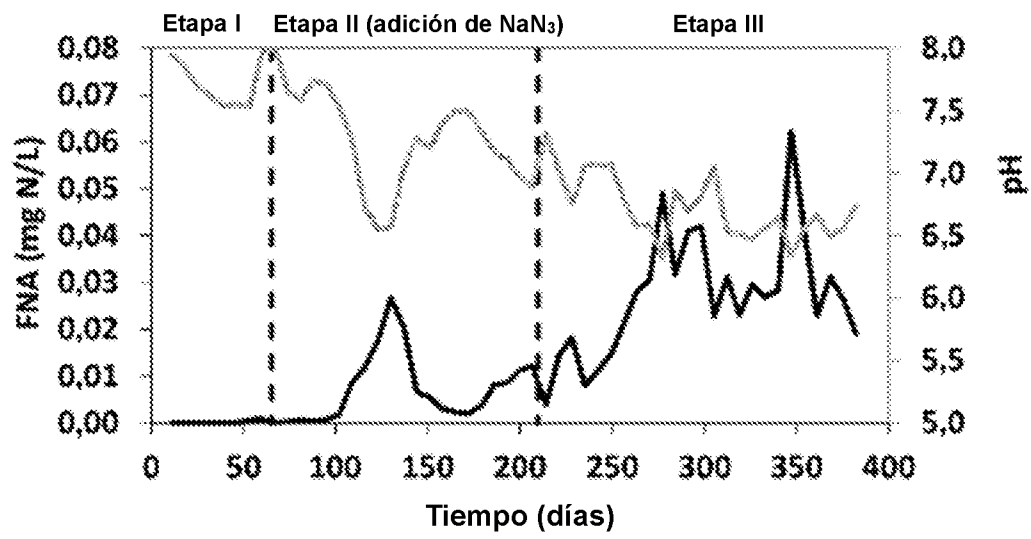


FIG. 4

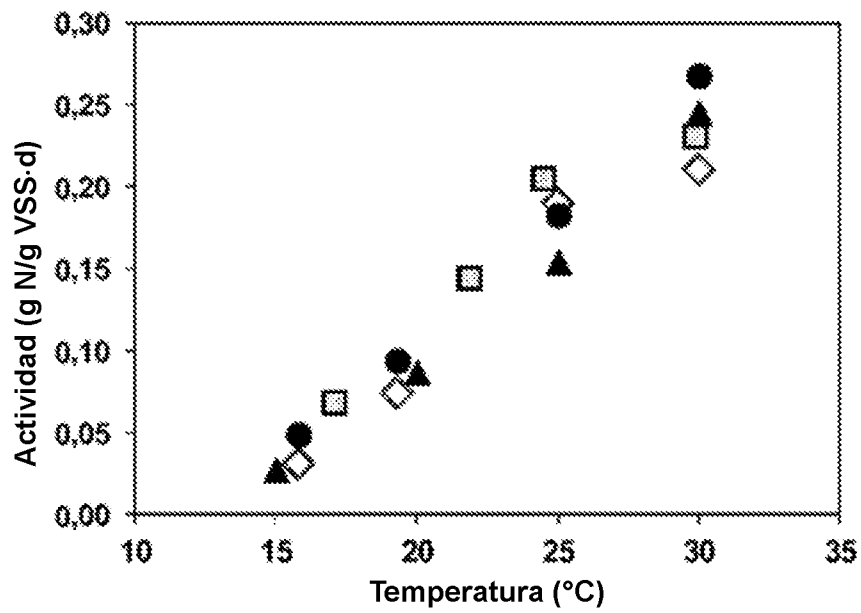


FIG. 5A

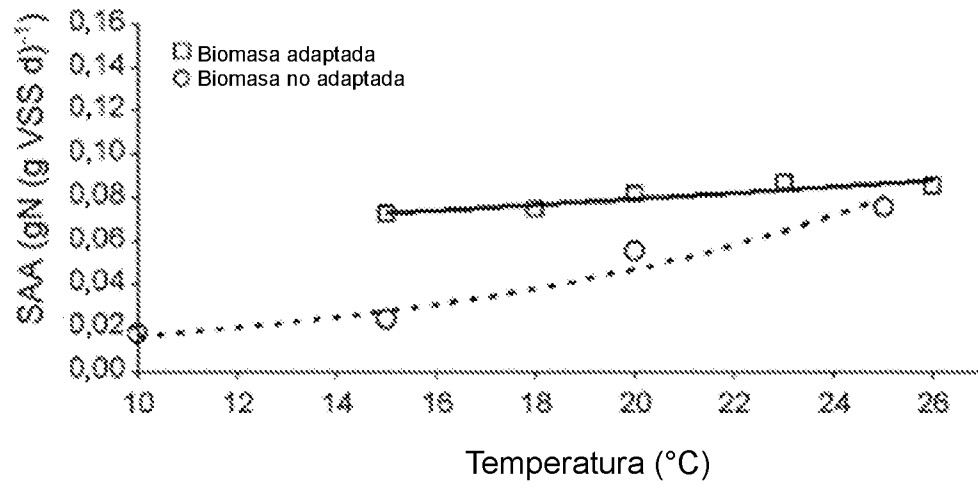


FIG. 5B