

ANAMMOX® Eliminación Sostenible de Nitrógeno

Primer Reactor de Cadagua en la EDAR de Rubí

Autores/Authors: Javier Arrieta Morales (jefe Depto. I+D+i, Cadagua S.A. , jam@cadagua.es); Willie Driessen (global technology manager , Paques Technology B.V., w.driessen@paquesglobal.com), Jordi Palomo Tardio (jefe de planta EDAR Rubí, Cadagua S.A., jpalomo@cadagua.es), Javier Martinez Revaliente (técnico puesta en marcha, Cadagua S.A., fimartinezrevaliente@cadagua.es)

Keywords: ANAMMOX®, Nitritación parcial, fango granular, tratamiento de retornos, nitrógeno

1 Introducción

La empresa Biotecnológica Paques y Cadagua llevan trabajando juntos en el mercado español desde hace 45 años. Las referencias industriales con tecnología anaerobia granular BIOPAQ-IC® son sin duda las más conocidas. Los más de 50 reactores anaerobios instalados a lo largo de toda la geografía española, suman una capacidad de tratamiento de más 1.500 toneladas al día de DQO. Y esto, considerando los rendimientos habituales y la generación equivalente de biogás, equivale a una potencia energética disponible de aproximadamente 15 millones de kilocalorías al día.

Pero PAQUES y Cadagua disponen de otras tecnologías ampliamente referenciada con un importante potencial de ahorro energético para las depuradoras municipales, como la Tecnología ANAMMOX® recientemente instalada en la **EDAR de Rubí** y en fase de construcción en la **EDAR de Terrasa**, ambos para la Agencia Catalana del Agua (**ACA**). Adicionalmente disponen del reactor PHOSPAQ® para recuperación de fósforo en forma de estruvita.

La eliminación sostenible del nitrógeno en los retornos de digestión no es una necesidad únicamente derivada del ahorro energético que supone, la nueva legislación europea de saneamiento, que se encuentra en fase de debate y definición, va a reducir significativamente los límites permitidos en el vertido, y la tecnología ANAMMOX va a resultar clave para garantizar estos nuevos límites.

2 El proceso ANAMMOX®

2.1 Los retornos de digestión

La Digestión Anaerobia de los lodos de depuradoras es un método eficaz de generación de energía renovable, pero la eliminación de nutrientes (N, P) en este proceso es muy limitada. Y como resultado, los retornos líquidos derivados del proceso de digestión contienen concentraciones muy elevadas de Nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$) y Orto-fosfatos (PO_4). Recientemente la implantación de la práctica de la Co-digestión de residuos industriales y agrícolas con los lodos de depuradora, así como la instalación de tratamientos avanzados como la Hidrólisis Térmica de Lodos (HTC), están incrementando de forma muy notable las cargas de nutrientes de estos retornos.^[1] Esto implica mayores consumos energéticos en la línea de agua para eliminar los nutrientes de forma convencional, pudiendo incluso poner en riesgo el cumplimiento de las obligadas garantías de N y P en el vertido a los cauces públicos.

2.2 El proceso PN/A

El proceso de Nitrificación Parcial / Anammox (PN/A) ANAMMOX® es un proceso biológico de deamonificación para eliminar de forma energéticamente eficiente el nitrógeno amoniacal en los efluentes de deshidratación de los fangos digeridos, así como en efluentes industriales ricos en nitrógeno tratados anaeróbicamente.

El método convencional de eliminación de nitrógeno en depuración implica varios procesos biológicos; La nitrificación es el proceso donde el amonio se oxida a nitrato, la nitrificación por su parte es el proceso en el que el amonio se oxida completamente a nitrato y la desnitrificación es el proceso que convierte el nitrato a nitrógeno con el aporte de una fuente de carbono.

En contraposición al método convencional tenemos el proceso de conversión ANAMMOX® (Oxidación anaeróbica del amonio), que es un elegante atajo en el ciclo natural del nitrógeno, donde el amonio (NH_4^+) y el nitrito (NO_2^-) son convertidos en nitrógeno gaseoso en condiciones anaerobias y en ausencia de una fuente externa de carbono. Este proceso combina la nitrificación parcial con la oxidación anaerobia del amonio. La combinación de ambos procesos también conocida como Nitrificación Parcial / Anammox (PN/A) se resume en la siguiente ecuación



El siguiente esquema (Figura 1) muestra la comparación entre el proceso convencional y el ANAMMOX® de forma gráfica:

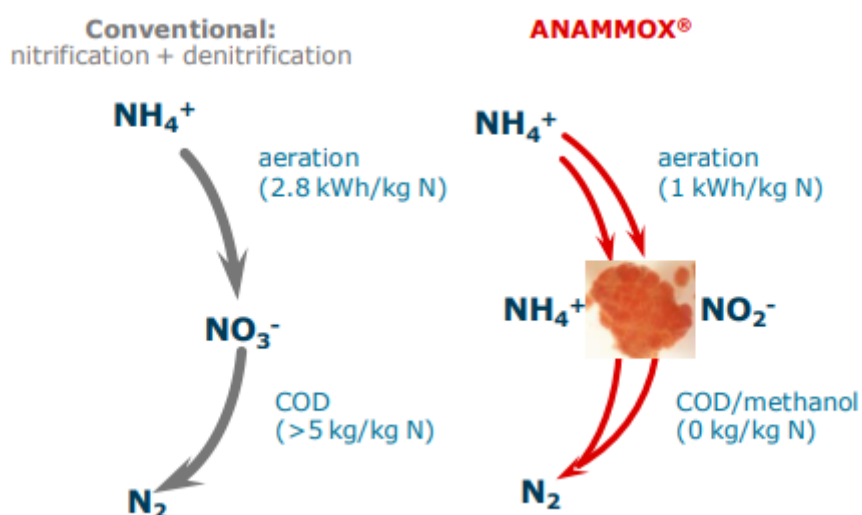


Figura (1). Esquema comparativo del proceso convencional vs ANAMMOX®

Como en el proceso PN/A, solo una parte del nitrógeno amoniacal se oxida a nitrito (NO_2^-), en lugar de nitrato, por lo que se puede alcanzar un ahorro de energía de la aireación de hasta un 60%, y las necesidades de materia carbonosa son inexistentes al tratarse de procesos autótrofos.

En definitiva, el proceso ANAMMOX® aporta una solución sostenible al problema de los retornos de deshidratación.

2.3 La tecnología ANAMMOX® de Paques

La empresa Paques desarrollo el proceso para fines comerciales en cooperación con la Universidad Tecnológica de Delft y la universidad de Nijmegen. Desde la primera planta a gran escala puesta en marcha en la ciudad de Rotterdam en 2002 tratando los retornos de la digestión anaerobia de la depuradora, se han implementado casi 70 instalaciones. Los primeros reactores trabajaban en dos etapas; nitrificación parcial seguido del proceso de ANAMMOX®. Pero pronto desarrollaron el proceso combinado “one-step” ANAMMOX® integrando ambas etapas mediante biomasa granular. El primer reactor en una etapa se instaló en el 2006 en la depuradora de Olburgen en Holanda. Desde entonces y gracias a la flexibilidad del sistema, se han instalado reactores de muy diversa geometría, tamaño y materiales; cilíndricos, rectangulares, reaprovechando depósitos existentes, y de alturas variables entre 5 y 10 metros y diseñados para tratar cargas de entre 60 y más de 11.000 kgN/día. Prueba de ello es la variedad de configuraciones mostradas en la siguiente figura:



Figura (2). Fotos de varios reactores ANAMMOX®. Rotterdam (2002), Olburgen (2006), Son (2014), Tilburg (2017), Brussels (2020), Rubí (2022)

2.4 La biomasa Granular la clave

La clave del éxito del proceso es lograr de las condiciones hidráulicas óptimas que promueven el desarrollo de gránulos densos y estables. Los gránulos del reactor one-step PN/A ANAMMOX® consisten en una capa exterior aeróbica rica en biomasa oxidadora de amonio AOB y un núcleo anóxico de biomasa Anammox. (Figura 3). En la práctica el granulo También contiene otros microorganismos como bacterias heterotróficas que se alimentan de la materia orgánica presente en el agua. La decantabilidad de estos gránulos es muy superior a la de la biomasa floculenta.

El diseño hidráulico del separador de biomasa interno es tal que los sólidos finos y ligeros del influente y la biomasa floculenta presente en el reactor son selectivamente lavados, reteniendo preferentemente a la biomasa densa y granular. Y es precisamente gracias a la alta densidad y alta superficie granular que podemos diseñar reactores compactos trabajando a altas cargas volumétricas, alcanzando cargas de hasta 2,5 kgN/m³/d.

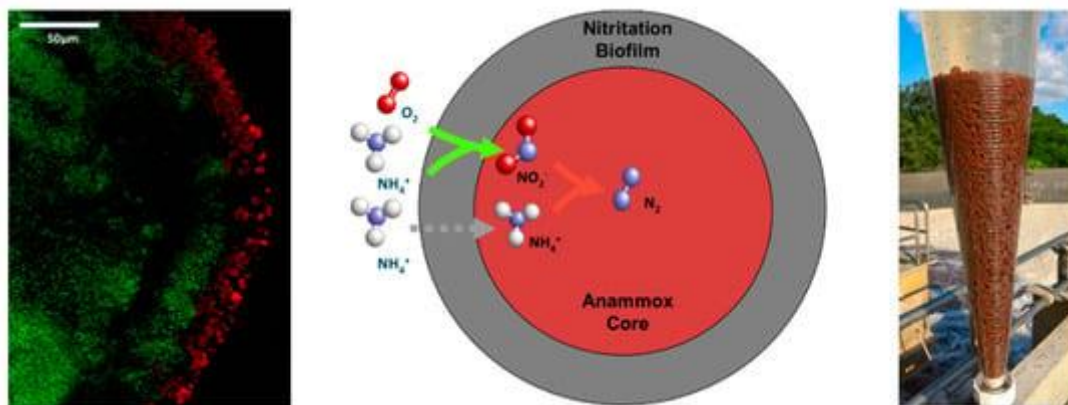


Figura (3). Imagen FISH de una sección de un granulo ANAMMOX® (izquierda) mostrando las bacterias ANAMMOX® (verde) y la capa superficial de biomasa oxidadora de amonio (rojo). Esquema simplificado de un granulo ANAMMOX® (centro) y cono Imhoff con gránulos PA/A ANAMMOX® (derecha) ^[2]

La matriz exterior del gránulo protege a las bacterias Anammox del interior de cualquier condición extrema presente en el agua (e.g. NO_2 , pH, DO, etc.). Como resultado los gránulos son más resilientes que la biomasa floculente ante compuestos potencialmente inhibitorios. Los gránulos típicos que se forman en un reactor ANAMMOX® de Paques tienen diámetros típicos de entre 2 y 4 mm con rangos que van desde 1 hasta 10 mm. (Figura 4)



Figura (4). Ejemplo de gránulos ANAMMOX® granules: solo AMX (izq) y PN/AMX (4 × dcha) con diámetros típicos de 1, 1–2, 2–5, 3–5, and 4–6 mm, respectivamente ^[2]

La matriz granular juega un papel importante en el control del proceso al facilitar un mecanismo natural contra las Bacterias Oxidadoras del Nitrito (NOB). El diseño hidráulico del reactor promueva únicamente la retención de los gránulos de tal forma que la biomasa NOB de naturaleza floculenta es constantemente lavada del sistema. Para que la biomasa NOB se desarrollara tendría que hacerlo en los propios gránulos. Pero para tener acceso a sus nutrientes (Nitrato y oxígeno) tendrían que crecer en las capas más superficiales y gracias al control del proceso la actividad biomasa Oxidadora de Amonio (AOB) crea un rápido gradiente de oxígeno reduciendo al mínimo la disponibilidad de oxígeno para las NOB. Como resultado la producción de nitrato en el proceso ANAMMOX® se ve limitada a lo generado estequiométricamente por la propia biomasa Anammox que equivale a un 11% del amonio convertido ($0,11 \text{ mol NO}_3$ producido por mol NH_4 eliminado).

2.5 La importancia de un sistema de control robusto

El reactor ANAMMOX® está equipado con un sistema de aireación por burbuja fina que asegura la transferencia energéticamente eficiente del oxígeno con valores típicos de $1 \text{ kWh/kg NH}_4\text{-N}$ eliminados. Pero lo más importante es el sistema de control PLC/SCADA que utiliza una serie de algoritmos multiparamétricos.

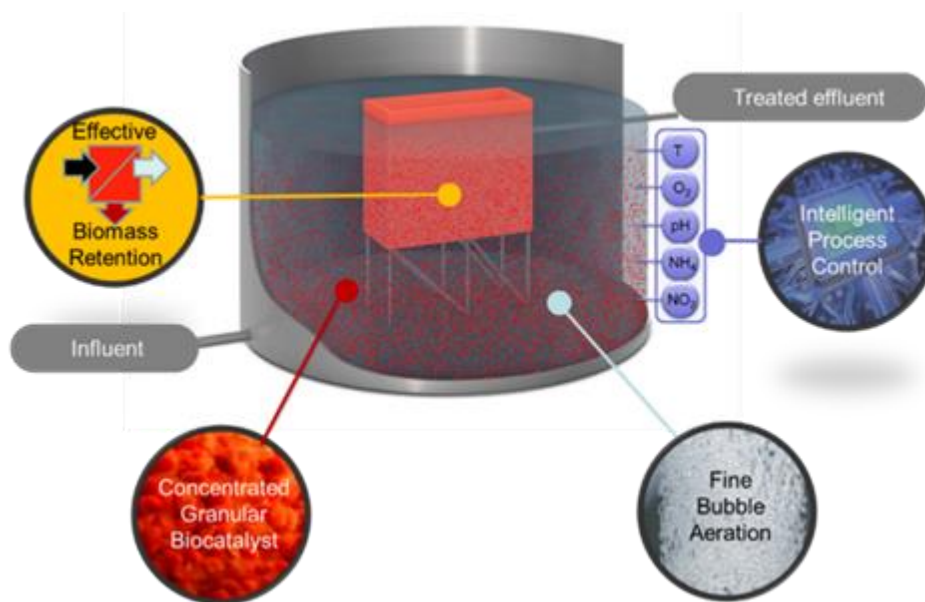


Figura (5). Dibujo esquematizado de los internos y del sistema de control del reactor ANAMMOX® [2]

El sistema de control del ANAMMOX cuenta con cuatro lazos de control alternativos cuyo objetivo global no es otro que asegurar la máxima eficacia de tratamiento a la vez que proteger a la biomasa. Se miden de forma continua la temperatura, la conductividad, el pH, el Oxígeno disuelto, el Nitrógeno amoniacal y los nitritos, siendo los cuatro últimos parámetros los que gobernarán en cada momento la cantidad de aire necesaria para eliminar el nitrógeno dentro de los límites seguros.

2.6 Otros factores a tener en cuenta

Alcalinidad. La conversión de amonio en un proceso PN/A consume sobre 1,1 moles de alcalinidad por mol de NH_4 eliminado. Este valor es el resultado de la alcalinidad consumida en la nitrificación (2 moles de alcalinidad por mol de amonio) y la alcalinidad recuperada por la conversión del amonio (0,13 moles de alcalinidad por mol de amonio). Los efluentes de deshidratación del fango digerido anaeróbicamente normalmente disponen de suficiente alcalinidad para asegurar altos rendimientos de eliminación. Pero en ocasiones la disponibilidad es menor o los requisitos de eliminación son muy elevados. El uso de cloruro férrico en la digestión anaerobia de los fangos por ejemplo consume parte de la alcalinidad disponible. Ante esta situación tenemos dos alternativas:

- Asumir rendimientos menores de eliminación. El proceso se limitará a la alcalinidad disponible en el agua
- Incrementar la alcalinidad dosificando sosa (NaOH)
- Sustituir algún reactivo aguas arriba por ejemplo MgCl_2 por $\text{Mg}(\text{OH})_2$ en procesos de generación de estruvita.

Micronutrientes. Aunque la mayoría de las aguas contiene suficientes elementos traza esenciales, en ocasiones la dosificación de micro-nutrientes se hace necesaria para asegurar la bio-disponibilidad de estos.

En aguas que contengan compuestos orgánicos de elevado peso molecular con propiedades quelantes, por ejemplo. Estos compuestos se unen a los metales, secuestrándolos, y reduciendo su bio disponibilidad. Un ejemplo de esta problemática se ha observado en reactores anammox tratando retornos de deshidratación de digestores anaerobios con hidrólisis térmica de fangos (THP-AD).

3 El reactor ANAMMOX® de la EDAR de Rubí

3.1 Diseño del reactor de Rubí

El pasado verano Cadagua instaló el primer reactor ANAMMOX® en España en la EDAR de Rubí perteneciente a la Agencia Catalana del Agua. El reactor instalado tiene un volumen útil de 120 m³ y trabajando con cargas volumétricas de diseño de 2 kg NH₄-N/m³/d puede tratar cargas de unos 240 kilos de nitrógeno al día. Esta cantidad de nitrógeno es la contenida en los aproximadamente 240 m³ diarios de ecurridos de centrifugación que contiene en el entorno a los 800-1.000 mg/l de nitrógeno amoniacal. Por lo tanto, el tiempo de retención hidráulico medio en el reactor ANAMMOX® es de unas 12 horas.

La instalación se completa con un tanque de homogeneización y un Astraseparator decantador lamelar. Este último, ubicado entre la homogeneización y el reactor, es un elemento añadido de seguridad que tiene como objetivo evitar la entrada excesiva de sólidos al reactor.



Figura (6). Foto de los elementos principales que componen el proceso ANAMMOX® de Rubí



Figura (7). Foto con detalles del reactor ANAMMOX® de Rubí



Figura (8). Foto con detalles del tanque de homogenización y bombeo

3.2 Puesta en Marcha del reactor ANAMMOX de Rubí

La alta velocidad de sedimentación de la biomasa granular permite su recolección por gravedad de forma sencilla. Por lo que la utilización de fango en exceso de otros reactores para inocular uno nuevo es una operación relativamente sencilla si se dispone de una red adecuada de instalaciones operativas como es el caso de Paques y Cadagua. Los gránulos se transportan en camión pudiendo ajustar la carga de siembra a una ratio de carga determinado. Y a medida que la biomasa va creciendo se almacena en el propio reactor a la espera de su utilización en nuevos reactores.

El tiempo necesario para la Puesta en Marcha va a depender de la cantidad de inóculo sembrado. En el caso de la EDAR de Rubí se realizó una carga de 15 m³ de gránulos activos capaces de tratar el 100% de la carga de diseño del reactor que era de unos 240 kilos de Nitrógeno al día. En estas condiciones la puesta en marcha se puede concluir en menos de una semana.



Figura (9). Foto de la siembra del reactor y detalle de los gránulos de biomasa NP/A sembrados en el reactor de Rubí

La puesta en marcha del reactor coincidió con trabajos de ampliación y puesta en marcha de diversos procesos de la propia depuradora, por lo que, durante las primeras semanas de operación, la carga de nitrógeno que llegaba desde la digestión anaerobia de la depuradora era inferior a la de diseño. La Digestión se encontraba en fase de arranque y por lo tanto las cargas de nitrógeno amoniacal y de alcalinidad eran bajas. Así mismo los escurridos contenían elevadas concentraciones de materia orgánica. Todo ello fue evolucionando a lo largo de los meses de agosto y septiembre y el proceso se fue estabilizando hasta alcanzar las condiciones de diseño esperadas.

El siguiente gráfico muestra la evolución del rendimiento del ANAMMOX de Rubí que tras la estabilización del digestor anaerobia ha ido subiendo hasta alcanzar niveles actuales superiores a un 75% en Nitrógeno amoniacal y superiores al 70% en nitrógeno total, sin necesidad de añadir alcalinidad externa.

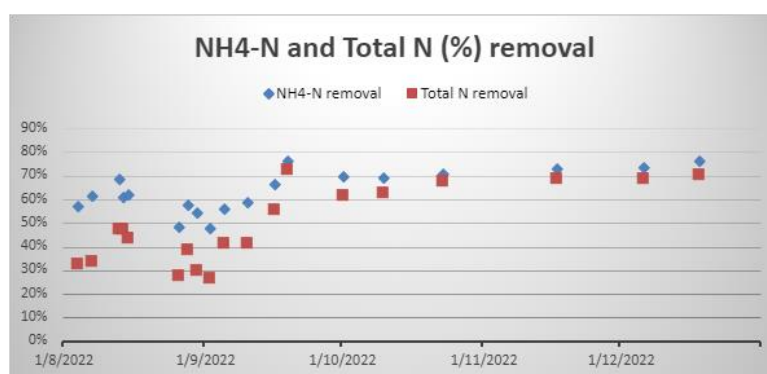


Figura (10). Gráfico de rendimientos del Anammox en puesta en marcha en la EDAR de Rubí

El reactor se ha mantenido en un rango de temperatura de entre 32 y 38 °C y un pH de trabajo ligeramente inferior a 7 y como se puede observar en el siguiente gráfico a partir del mes de septiembre 2022 la concentración de nitrógeno amoniacal del influente fue subiendo desde 300-400 mg/l hasta los actuales 800-1.000 mg/l mientras que el efluente se ha mantenido estable en el entorno a 200 mg/l.

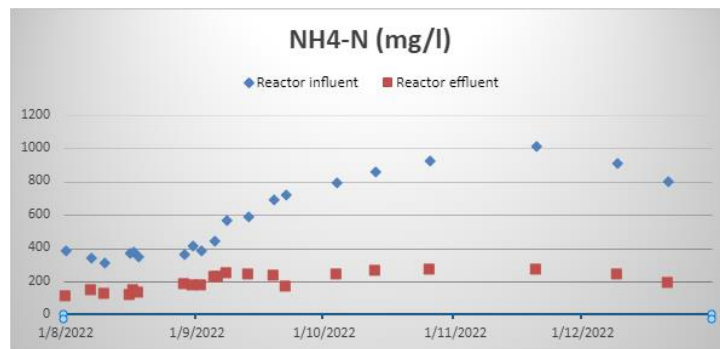


Figura (11). Valores de N amoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$) enfluente y efluente

Entre los parámetros que nos indican la salud y eficacia de un reactor Anammox tenemos los niveles de Nitratos (NO_3^-) y Nitritos (NO_2^-). El primero nos da una indicación del control sobre la biomasa NOB y como se puede observar en el siguiente gráfico, tras la puesta en marcha los niveles están en el entorno a 40 mg/l.

Este valor es muy inferior al teórico esperado equivalente a un 11% del $\text{NH}_4\text{-N}$ convertido, demostrando la efectiva supresión de biomasa NOB. Los nitritos se encuentran en todo momento por debajo de 2,5 mg/l. Estos valores de nitratos y nitritos son indicativos de una elevada actividad y un proceso anammox bien controlado.

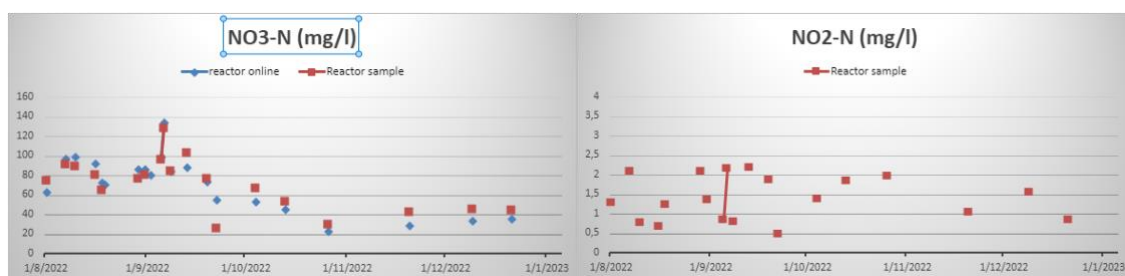


Figura (12). Valores de Nitratos ($\text{NO}_3\text{-N}$) y Nitritos ($\text{NO}_2\text{-N}$) en el reactor Anammox de Rubí

4 Conclusiones

Cadagua y Paques acumulan más de 45 años de experiencia instalando y operado reactores biotecnológicos en España y recientemente hemos instalado, arrancado y estamos operando de forma satisfactoria el primer reactor ANAMMOX® en España en la EDAR de Rubí.

El proceso ANAMMOX® de Paques es un proceso biológico en continuo que trabaja con biomasa granular PN/A en una sola etapa.

Desde el año 2002 se han instalado más de 70 reactores con una capacidad total instalada superior a 150.000 kgN/d y en base a la experiencia acumulada en los últimos 20 años podemos concluir:

- La tecnología ANAMMOX® genera importantes ahorros energéticos en el proceso de depuración y contribuye de forma significativa al cumplimiento de los parámetros de vertido cada vez más exigentes en materia de nutrientes.
- Se puede alcanzar cargas máxicas consistentes de hasta $2,5 \text{ kg NH}_4\text{-N}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$
- Se pueden mantener eficiencias de eliminación estables a largo plazo.

- El control de proceso avanzado es capaz de hacer frente a situaciones específicas como la falta de alcalinidad o la adición de un exceso de alcalinidad.
- El conocimiento de los requisitos de micro-nutrientes para aguas residuales específicas contribuye a la estabilidad del proceso a largo plazo y a maximizar la eficiencia de eliminación.

La tecnología PN/A ANAMMOX® ha demostrado caracterizarse por:

- Su mecanismo hidráulico de selección natural supera la actividad oxidadora de nitrito no deseada.
- Posee una alta resistencia contra compuestos inhibitorios como las altas concentraciones de nitritos.
- Las altas velocidades de sedimentación facilitan la retención de los gránulos en el reactor, a la vez que facilita su concentración y almacenamiento de la biomasa en exceso para arrancar nuevos reactores
- La disponibilidad que tiene Paques y Cadagua de biomasa anammox granular facilita una rápida puesta en marcha de nuevas instalaciones ANAMMOX®

El reactor ANAMMOX® de Rubí se ha puesto en marcha en un tiempo récord gracias a la disponibilidad de fango de siembra granular y ha demostrado en los meses que lleva operando su robustez y fiabilidad.

5 Agradecimientos

A la Agencia Catalana del Agua (ACA) por apostar por la innovación y la sostenibilidad, a Paques BV por tantos años de relación y excelencia tecnológica y al equipo de Puesta en Marcha y Operación y Mantenimiento de Cadagua por su compromiso y entusiasmo.

Referencias

1. Driessen, W.J.B.M., Van Veldhoven, J.T.A., Janssen, M.P.M., Went, C., Hobbs, E. and van Loosdrecht, M.C.M. (2020) Operational experience and lessons learned on treatment of dewatering reject liquors from thermally hydrolysed and anaerobically digested (THP-MAD) biosolids – Two case studies. In: *Proceedings IWA 2020 Nutrient Recovery & Removal conference, Aalto University, Helsinki, Finland, September 1-3*. 3 p.
2. Driessen, W., Hendrickx, T. (2021) Two Decades of Experience with the Granular Sludge Based ANAMMOX® Process Treating Municipal and Industrial Effluents. *Processes* 2021, 9(7), 1207. <https://doi.org/10.3390/pr9071207>, 15p.