

Diseñar para minimizar las emisiones de N₂O en la nueva Kalmarsundsverket - Water Recycling Plant (Suecia)



Puntos clave del caso:

- Se adoptó un enfoque de ‘minimal N₂O by design’ para minimizar la huella de carbono de una nueva planta de tratamiento ya en la fase de diseño
- El modelo AMNOXA™ visualizó el rendimiento de la planta y los puntos calientes de N₂O en 3D y reveló dos riesgos dominantes de formación de N₂O en los diseños de la nueva planta
- A partir de los resultados del modelo se ajustaron elementos críticos del diseño: modificación de la pantalla deflectora, ubicación de la dosificación externa de carbono y estrategias de aireación
- La eficiencia de la planta se maximizó en paralelo a la minimización de N₂O
- Los resultados del modelo se utilizarán también para determinar los futuros puntos de monitorización de N₂O

Autores:



Dr. Qing Zhao,
Process and Development Engineer,
Kalmar Vatten



Dr. Giacomo Bellandi
Tech Lead,
AM-Team

Introducción y planteamiento del problema

La empresa sueca de agua Kalmar Vatten está construyendo la planta de reciclaje urbano de referencia de Suecia —Kalmarsundsverket— como parte de su misión de aplicar un tratamiento avanzado a las aguas residuales urbanas y llegar a ser climáticamente neutra, elevando al mismo tiempo el estatus de la infraestructura del agua. Más allá de depurar aguas residuales, esta instalación innovadora producirá agua regenerada para su uso futuro en riego e industria, enmiendas del suelo certificadas y biógas para calor y electricidad. Para Kalmar Vatten, abordar las emisiones de gases de efecto invernadero en la fase de diseño representa un paso crucial hacia la neutralidad climática, ya que las emisiones de proceso influyen de forma significativa en su huella de carbono.

Kalmar Vatten encargó a AM-Team integrar unas emisiones mínimas de óxido nitroso (N_2O) en la fase de diseño de su nueva estación depuradora de aguas residuales Kalmarsundsverket. El objetivo era comprender los mecanismos de formación de N_2O en las distintas variantes de diseño e identificar las configuraciones óptimas del biorreactor que minimizasen las emisiones y maximizasen al mismo tiempo la eficiencia del tratamiento, materializando el principio de ‘minimal N_2O by design’. AM-Team trabajó en estrecha colaboración con el proveedor de los equipos (Xylem) y la ingeniería (Eliquo Malmberg Water) para encontrar soluciones de mitigación viables y eficaces.

Solución y objetivos

Este enfoque de ingeniería digital con visión de futuro permitió ensayar virtualmente múltiples configuraciones de diseño, imposibles de evaluar in situ en una planta que aún no existe. Aprovechar de forma óptima la información del modelo permitiría reducir las emisiones y mejorar la eficiencia desde el primer día de operación.

Los objetivos eran:

- comprender los mecanismos de formación de N_2O en los nuevos diseños del biorreactor
- optimizar la ubicación de los agitadores y de la aireación para minimizar la producción de N_2O
- ensayar y comparar estrategias de mitigación para distintas opciones de diseño
- determinar las ubicaciones óptimas de los sensores de N_2O para la monitorización futura
- integrar mejoras de eficiencia junto con las reducciones de emisiones

"AMNOXA™ enabled us to test a multitude of design scenarios. We could see the exact effect of how different mixing options, aeration strategies, and carbon dosing locations would affect N_2O formation and plant performance."

«Con AMNOXA™ pudimos ensayar multitud de escenarios de diseño. Veíamos con exactitud cómo afectaban las distintas opciones de mezcla, las estrategias de aireación y las ubicaciones de dosificación de carbono a la formación de N_2O y al rendimiento de la planta.»

- Dr. Qing Zhao, Process and Development Engineer,
Kalmar Vatten



Enfoque

Para una evaluación integral en 3D de la nueva planta se empleó el marco de modelización AMNOXA™ de AM-Team. AMNOXA™ combina un tratamiento especializado de los datos de depuración con una mezcla de modelización 3D y dinámica. El modelo 3D utilizado en este proyecto consiste en un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) de base física con biocinética integrada. La conversión de nutrientes y carbono y la producción, el transporte y el arrastre de N_2O se tienen en cuenta de forma realista.

El enfoque de modelización (figura 1) incluyó:

- geometría detallada del reactor con todas las zonas, entradas, salidas, agitadores y difusores
- datos de diseño para dos escenarios: condiciones de puesta en marcha en 2027 (18.000 m³/d) y capacidad futura en 2050 (27.000 m³/d)
- análisis hidrodinámico para identificar patrones de mezcla y posibles problemas de reflujo
- análisis de puntos calientes de N_2O y de causa raíz para localizar los factores locales que impulsan la producción de N_2O
- ensayo virtual de escenarios de mitigación, incluidos el reparto del influente, las estrategias de aireación y la optimización de la dosificación de carbono

"The 3D hotspot analysis is one of the key features of AMNOXA™, allowing to optimize biological treatment plants in a very effective manner."

«El análisis de puntos calientes en 3D es una de las funciones clave de AMNOXA™ y permite optimizar plantas de tratamiento biológico de forma muy eficaz.»

- Dr. Giacomo Bellandi, Tech Lead, AM-Team

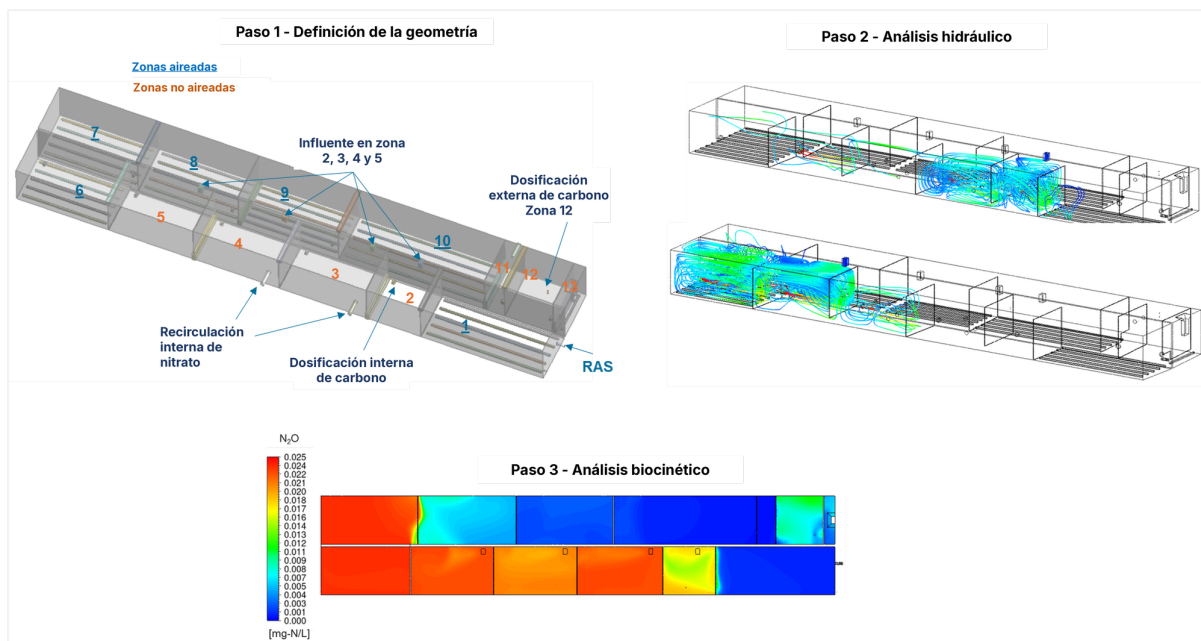


Figura 1. En un primer paso se construyeron modelos 3D de los diseños existentes, seguidos de un análisis hidráulico general (paso 2) y un análisis biocinético (paso 3). Este último visualizó el rendimiento de la planta y la producción y emisión de N_2O en 3D completo.

Resultados y conclusiones

Análisis de causa raíz: comprender los mecanismos de formación de N_2O

AMNOXA™ reveló las rutas bioquímicas específicas que impulsan la formación de N_2O en el nuevo diseño del reactor. Como muestra el mapa de calor de N_2O de la figura 2, se identificaron dos mecanismos principales que generan 'puntos calientes locales de producción de N_2O ':

Desnitrificación por AOB: Al inicio de las zonas aerobias, un bajo nivel de oxígeno disuelto (DO) combinado con concentraciones elevadas de amoníaco haría que las bacterias oxidantes de amoníaco (AOB) produjesen N_2O por la ruta de

desnitrificación¹. Esto resultaba especialmente evidente en zonas (figura 1) donde la transición de condiciones anóxicas a aerobias creaba una zona en la que el nivel de DO tardaba en alcanzar la consigna, lo que ofrece condiciones ideales para esta ruta.

Desnitrificación heterótrofa: En las zonas anóxicas donde la relación carbono/nitrógeno (C/N) era subóptima, la desnitrificación incompleta provocaba la acumulación de N₂O como producto intermedio². El diseño inicial presentaba desnitrificación incompleta sobre todo en las zonas donde la dosificación externa de carbono aún no se había mezclado ni consumido por completo por las bacterias heterótrofas, generando puntos calientes de producción de N₂O.

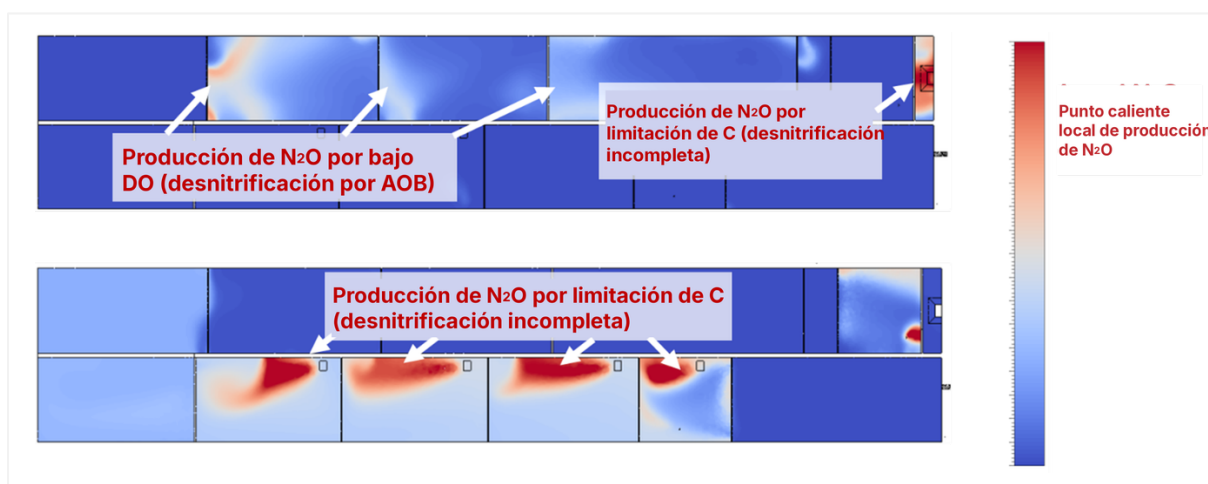


Figura 2. Vista en planta del reactor con el **análisis de puntos calientes de N₂O**. La producción de N₂O por desnitrificación por AOB (arriba) apunta a una posible mejora del reparto y la estrategia de aireación. Los puntos calientes causados por la desnitrificación heterótrofa (abajo) muestran una elevada actividad de producción de N₂O en las proximidades de las tuberías de entrada.

Optimización del diseño: ‘minimal N₂O by design’

La potencia de minimizar el N₂O en la fase de diseño quedó clara al ensayar diversas configuraciones del reactor. Cada modificación del diseño podía evaluarse por su efecto tanto en la formación de N₂O como en la eficiencia global de la planta:

Mitigar los reflujos no deseados: El análisis hidrodinámico reveló reflujos significativos en algunas zonas anóxicas. El modelo mostró que ajustar la orientación de los agitadores o las pantallas deflectoras podría reducir los reflujos un 70-80% sin comprometer la

¹ Desnitrificación por AOB: aunque las AOB deberían nitrificar ($\text{NH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2$), también pueden generar N₂O con concentraciones elevadas de amoníaco y bajo oxígeno disuelto: $\text{NO}_2 + \text{NH}_4 \rightarrow \text{N}_2\text{O}$ ('desnitrificación por AOB')

² Desnitrificación incompleta: aunque las bacterias heterótrofas deberían desnitrificar por completo ($\text{NO}_3 + \text{C} \rightarrow \text{N}_2$), pueden detenerse en N₂O en condiciones limitantes de C ($\text{NO}_3 + \text{C} \rightarrow \text{N}_2\text{O}$)

eficiencia de mezcla. Este cambio de diseño mejoró los patrones de flujo y minimizó el riesgo de recirculación indeseada de oxígeno hacia las zonas anóxicas, que habría agravado la producción de N_2O por la ruta de desnitrificación por AOB. Finalmente, el consorcio del proyecto seleccionó el ajuste de la pantalla deflectora como la opción más viable para el diseño definitivo.

Ubicación de la dosificación de carbono: Los resultados mostraron que reubicar la tubería de dosificación externa de carbono mejoraba el reparto de C y la integridad de la desnitrificación (figura 3). Este reparto uniforme de C —solo alcanzable mediante ensayo virtual— mejoró tanto la mitigación de N_2O (al garantizar una desnitrificación completa) como la eficiencia operativa (al optimizar el consumo de carbono).

“AMNOXA™ is a solution that uniquely allows 'minimal N_2O by design'. This is crucial, as there is no monitoring data available in the design stage, but important decisions still need to be made. We wanted to achieve a design that had minimal N_2O baked in.”

«AMNOXA™ es la única solución que permite 'minimal N_2O by design'. Esto es crucial, porque en la fase de diseño no se dispone de datos de monitorización y, aun así, hay que tomar decisiones importantes. Queríamos lograr un diseño que llevara incorporado un N_2O mínimo desde el principio.»

- Dr. Qing Zhao, Process and Development Engineer, Kalmar Vatten

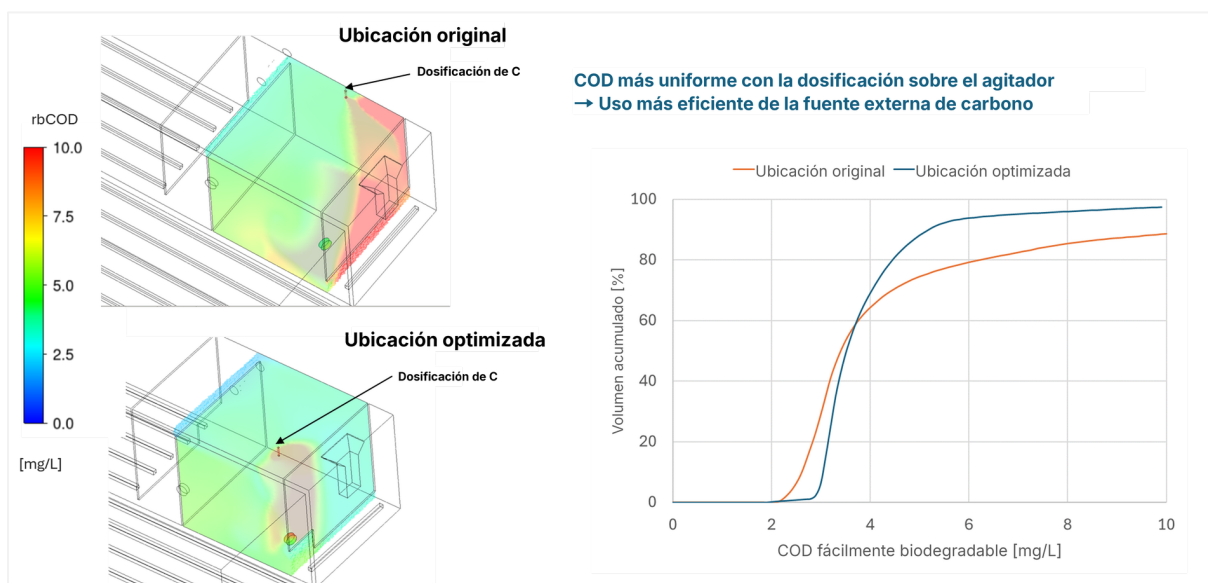


Figura 3. Distribución de la dosificación química con la ubicación original (arriba a la izquierda) y optimizada (abajo a la izquierda) de la dosificación de carbono. A la derecha, las curvas de distribución de volumen de la configuración optimizada muestran una mejora evidente para alcanzar una mezcla casi completa (curva vertical)

Estrategia de aireación: El ensayo virtual reveló que aumentar la aireación en la primera zona aerobia (zona 8) reducía la actividad de desnitrificación por AOB un 70% (figura 4a). Sin embargo, esto también incrementó la nitrificación global, con mayores niveles de nitrato y, en consecuencia, más producción heterótrofa de N_2O en las zonas de aireación. El efecto neto sobre el N_2O fue por tanto negativo (figura 4b). Esto demostró la importancia de un diseño de sistema equilibrado frente a optimizaciones aisladas, una conclusión clave que orientó las recomendaciones finales sobre las estrategias de control operativo.

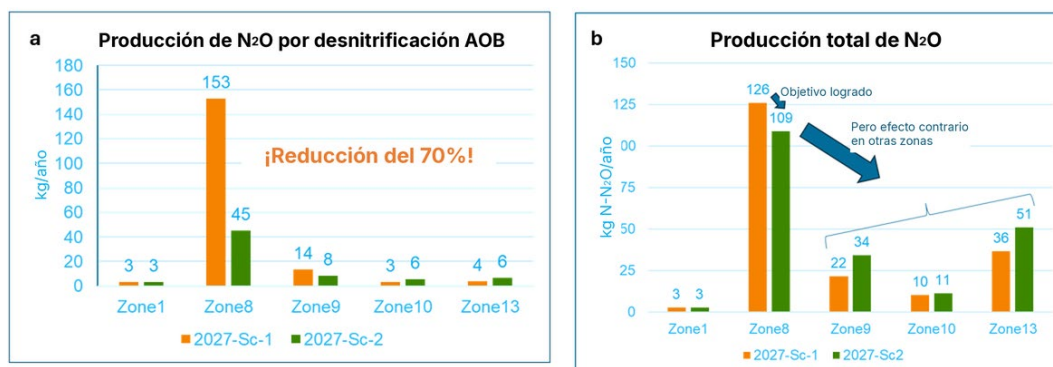


Figura 4. Tras la optimización general del sistema, AMNOXA™ se utilizó para localizar rutas específicas con las que reducir aún más el N_2O . El ajuste de la aireación disminuyó la producción por AOB un 70% (a), pero afectó negativamente a la producción de N_2O por desnitrificación, dando lugar a un aumento neto de N_2O (b). Por ello, esta medida no se implementó.

Ganancias de eficiencia y mejora del rendimiento (3E: Emissions, Effluent, Efficiency)

Las optimizaciones del diseño aportaron beneficios más allá de la mitigación de N_2O . El principio de ‘minimal N_2O by design’ condujo de forma inherente a una planta más eficiente:

Mejor eficiencia de mezcla: Se lograron menores reflujos y patrones de mezcla más uniformes, lo que mejora la cinética global del tratamiento y evita la recirculación de oxígeno que habría contribuido a la formación de N_2O .

Mejor aprovechamiento del carbono: Optimizar la ubicación de la dosificación de carbono mejoró la eficiencia del reparto, de modo que la misma cantidad de carbono externo logra mejores resultados de desnitrificación. Esto se traduce en un posible ahorro operativo gracias a un uso más eficaz de las fuentes de carbono y, al mismo tiempo, en menores emisiones de N_2O por desnitrificación incompleta.

Mejor calidad del efluente: Las estrategias equilibradas de aireación y dosificación de carbono diseñadas para minimizar el N_2O mejoraron también la eficiencia de eliminación de nitrógeno. Una desnitrificación completa implica menos fuga de nitrato y una mejor calidad global del efluente, lo que respalda el objetivo de Kalmar Vatten de

reducir el nitrógeno y el fósforo del efluente al menos un 35% respecto a su planta antigua, afrontando a la vez el aumento futuro de la carga de entrada.

“AM-Team’s hotspot analysis revealed where and how N₂O was likely to be produced. By pinpointing and tackling those root causes, we could mitigate N₂O based on a scientifically sound methodology.”

«El análisis de puntos calientes de AM-Team reveló dónde y cómo era probable que se produjese N₂O. Al localizar y abordar esas causas raíz, pudimos mitigar el N₂O con una metodología científicamente sólida.»

- Dr. Qing Zhao, Process and Development Engineer,
Kalmar Vatten



Ubicación de sensores para la monitorización futura

Dada la naturaleza compleja y dinámica del sistema, con múltiples zonas de aireación conmutable, el análisis con AMNOXA™ identificó las ubicaciones óptimas de sensores para la futura monitorización de N₂O. La modelización reveló que las emisiones pueden variar de forma notable durante las transiciones de condiciones anóxicas a aerobias y en los picos de carga. Para una monitorización completa se recomendó un modelo dinámico o un enfoque de gemelo digital que respalde la optimización continua durante la operación de la planta.

Conclusiones e impacto

Kalmar Vatten, los socios del consorcio Xylem y Eliquo Malmberg Water y AM-Team integraron con éxito principios de diseño climáticamente inteligentes en la nueva estación depuradora mediante la modelización con AMNOXA™. Al identificar los mecanismos de formación de N₂O en la fase de diseño, pudieron optimizar las configuraciones del reactor antes de la construcción, materializando el principio de ‘minimal N₂O by design’.

Los principales logros:

- comprensión integral de los mecanismos de formación de N₂O específicos del nuevo diseño del reactor, a partir de un análisis 3D de puntos calientes de N₂O
- optimizaciones prácticas del diseño: reducción del reflujo de un 70-80% mediante el refinamiento de la pantalla deflectora, ubicaciones optimizadas de dosificación de carbono y estrategias de aireación equilibradas

- identificación de parámetros operativos críticos (consigna de DO en la primera zona aerobia, optimización de la relación COD/N) para la gestión continua del N₂O
- mejoras simultáneas en emisiones, calidad del efluente y eficiencia operativa: el enfoque 3E que respalda la visión más amplia de economía circular de Kalmar Vatten

"While N₂O often gets attention within existing treatment plants, significant mitigation impact can be made in the design stage prior to construction. AMNOXA™ is the only solution that allows minimal N₂O by design, in combination with maximizing general plant performance."

«Aunque el N₂O suele recibir atención en las plantas de tratamiento existentes, se puede lograr un impacto de mitigación significativo en la fase de diseño, antes de la construcción. AMNOXA™ es la única solución que permite 'minimal N₂O by design', en combinación con la maximización del rendimiento general de la planta.»

- Dr. Giacomo Bellandi, Tech Lead, AM-Team



AMNOXA™ permitió evaluar a fondo la planta antes de su construcción. Kalmar Vatten puede poner en marcha su nueva planta con confianza, sabiendo que está diseñada desde su origen para minimizar las emisiones de N₂O y maximizar al mismo tiempo el rendimiento del tratamiento y la recuperación de recursos. Este proyecto establece un nuevo estándar para la infraestructura de aguas residuales consciente del clima: diseñar desde el principio unas emisiones mínimas, en lugar de incorporar soluciones a posteriori.

Publicado por:

AM-Team BV

Sint-Pietersnieuwstraat 11

9000 Gent (BE)

+32 480 64 70 76

info@am-team.com

www.am-team.com

Número de documento: 2026CC001

Versión 1

Sobre AM-Team:

AM-Team ofrece servicios de modelización y datos y soluciones de gemelo digital únicos en el mundo para diseñar, optimizar y digitalizar de forma inteligente plantas municipales e industriales de tratamiento de agua y aguas residuales. La empresa ha trabajado en más de 200 emplazamientos en 4 continentes. AM-Team trabaja directamente con empresas de agua y colabora además con ingenierías, empresas de software y proveedores de tecnología.

Soporte: Dirija cualquier consulta relacionada con este whitepaper a info@am-team.com o a su persona de contacto en AM Team.

Sujeto a cambios y errores. La información contenida en este documento puede modificarse en el curso del desarrollo posterior de los productos/servicios.

© AM-Team 2026 Todos los derechos reservados