

Implementación y verificación de un método selectivo para la determinación
de nitrógeno amoniacal en agua destinada al consumo humano

Implementación y verificación de un método selectivo para la
determinación de nitrógeno amoniacal en agua destinada al
consumo humano

Implementation and verification of a selective method for the determination
of ammoniacal nitrogen in water intended for human consumption

Emilio Pérez Pacheco ¹
Oliva Guadalupe Ortiz Cel ²
Jorge Carlos Canto Pinto ³
Félix José Aguilar Vázquez ⁴

RESUMEN

El ion amonio (NH_4^+) representa uno de los contaminantes nitrogenados más frecuentes en el agua, cuya presencia, derivada de fuentes naturales e industriales, exige una vigilancia estricta para asegurar su conformidad con los límites establecidos en normativas sanitarias. Este estudio tuvo como objetivo verificar la aplicabilidad del método para la determinación de nitrógeno amoniacal mediante electrodo selectivo, conforme a la NOM-127-SSA1-2021, apéndice 2.7. Se realizaron dos jornadas de análisis con muestras de agua purificada. En la primera etapa se construyó una curva de calibración empleando estándares de 0.1 a 1000 mg/L, que cumplió con el coeficiente de correlación (≥ 0.997) y rangos de recuperación (80-120%) establecidos por la NMX-AA-115-SCFI-2015.

En la segunda etapa se fortificaron las muestras para evaluar parámetros como intervalo lineal, límite de cuantificación, recuperación, sesgo, repetibilidad y reproducibilidad. Los resultados se ajustaron a los criterios normativos, demostrando la eficacia del método. El procedimiento permite una determinación precisa y confiable del nitrógeno amoniacal en agua para consumo humano, posicionándose como una herramienta analítica eficaz para fortalecer el monitoreo de la calidad del agua en sistemas de abastecimiento.

PALABRAS CLAVES: Nitrógeno amoniacal; Electrodo selectivo de amonio; Verificación de métodos analíticos; Agua para consumo humano.

¹ Tecnológico Nacional de México/ITS de Calkiní. C.A. Bioprocesos, Av. Ah-Canul, Calkiní, Campeche, C.P. 24900, México y Universidad Modelo, Centro de Investigaciones Silvio Zavala, 97305, Mérida Yucatán, México. emilioperez@modelo.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2242-1183>

² Tecnológico Nacional de México/ITS de Calkiní. C.A. Bioprocesos, Av. Ah-Canul, Calkiní, Campeche, C.P. 24900, México. ogortiz@itescam.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0003-3159-457X>

³ Tecnológico Nacional de México/ITS de Calkiní. C.A. Bioprocesos, Av. Ah-Canul, Calkiní, Campeche, C.P. 24900, México. Autor de correspondencia, jccanto@itescam.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-6133-056X>

⁴ Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Mérida, Mérida, Yucatán, México. felix.av@merida.tecnm.mx, <https://orcid.org/0009-0000-0719-2576>



Implementación y verificación de un método selectivo para la determinación
de nitrógeno amoniacal en agua destinada al consumo humano

Fecha de recepción: 25 de agosto, 2025.

Fecha de aceptación: 29 de septiembre, 2025.

ABSTRACT

The ammonium ion (NH_4^+) is one of the most common nitrogenous contaminants in water. Its presence, originating from both natural and industrial sources, requires strict monitoring to ensure compliance with regulatory health standards. This study aimed to assess the applicability of the method for determining ammoniacal nitrogen using a selective electrode, in accordance with NOM-127-SSA1-2021, Appendix 2.7. Two analytical sessions were conducted using purified water samples. In the first stage, a calibration curve was built using standards ranging from 0.1 to 1000 mg/L, achieving the required correlation coefficient (≥ 0.997) and recovery ranges (80-120 %) set forth in NMX-AA-115-SCFI-2015. In the second stage, samples were fortified to evaluate parameters such as linear range, limit of quantification, recovery, bias, repeatability, and reproducibility. The results met the regulatory criteria, demonstrating the method's efficacy. The procedure enables precise and reliable determination of ammoniacal nitrogen in drinking water, positioning itself as an effective analytical tool to strengthen water quality monitoring in supply systems.

KEYWORDS: Ammoniacal nitrogen; Ammonium selective electrode; Analytical method verification; Drinking water.

La calidad del agua destinada al consumo humano es un aspecto crítico en la protección de la salud pública, siendo regulada por normas internacionales y nacionales que establecen límites permisibles para una amplia gama de contaminantes. Entre estos contaminantes, el nitrógeno amoniacal, presente comúnmente en forma de ion amonio (NH_4^+), representa uno de los principales indicadores de contaminación nitrogenada en cuerpos de agua, debido a su origen tanto antropogénico como natural (Organization, 2004). Este compuesto puede derivarse de la descomposición de materia orgánica, excretas humanas, efluentes industriales, y lixiviados agrícolas, generando implicaciones significativas en el equilibrio de los ecosistemas acuáticos y en la potabilidad del agua (Camargo & Alonso, 2006).

Diversas investigaciones han demostrado que niveles elevados de nitrógeno amoniacal pueden provocar toxicidad en organismos acuáticos, alteración en procesos de nitrificación y formación de subproductos potencialmente dañinos para la salud humana durante el tratamiento del agua (Chen et al., 2020; Lin et al., 2025). A nivel normativo, la presencia de este compuesto es regulada por organismos como la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Huff et al., 2013) y, en México, por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021.

En este sentido, los métodos electroquímicos han cobrado gran relevancia debido a su simplicidad, sensibilidad, rapidez y bajo costo operativo (Lin et al., 2025). Particularmente, el uso de electrodos selectivos ha demostrado ventajas frente a métodos tradicionales como el de Nessler o el espectrofotométrico, al evitar reactivos tóxicos y permitir un análisis más directo y automatizable (Nollet & De Gelder, 2000). Sin embargo, la implementación de estos métodos en laboratorios de ensayo requiere un proceso riguroso de verificación que asegure su fiabilidad, exactitud y conformidad con los estándares técnicos establecidos (Belezia & de Almeida, 2021; Guideline, 2005).



Implementación y verificación de un método selectivo para la determinación de nitrógeno amoniacal en agua destinada al consumo humano

Estudios reportados en la literatura han evaluado la aplicabilidad de electrodos selectivos en matrices ambientales y en aguas residuales (Yun et al., 2019; Zhang et al., 2025). No obstante, existen escasos reportes enfocados en la verificación normativa de este tipo de metodología en agua potable conforme a los criterios de recuperación, linealidad, sesgo, repetibilidad y reproducibilidad establecidos por la norma mexicana NMX-AA-115-SCFI-2015. Esta carencia de información limita su uso rutinario en laboratorios de control de calidad de agua, particularmente ante la reciente entrada en vigor de los lineamientos de la NOM-127-SSA1-2021.

Es por ello por lo que la presente investigación tiene como objetivo verificar experimentalmente el método de determinación de nitrógeno amoniacal por electrodo selectivo en muestras de agua potable, conforme a la normativa mexicana vigente. Esta verificación permitirá establecer la validez del método propuesto para su implementación en laboratorios certificados, a fin de fortalecer las capacidades analíticas para el monitoreo de este contaminante en sistemas de abastecimiento.

JUSTIFICACIÓN

La presencia de nitrógeno amoniacal en el agua destinada al consumo humano representa un factor crítico para la salud pública y la integridad ambiental, ya que puede indicar contaminación por materia orgánica o efluentes industriales. La actualización de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 establece la aplicación de un método de prueba basado en electrodo selectivo de amonio, lo que exige a los laboratorios de ensayo validar y verificar su implementación conforme a los parámetros de calidad definidos por la NMX-AA-115-SCFI-2015. La necesidad de contar con métodos analíticos validados se vuelve relevante en regiones con alta vulnerabilidad hídrica, como las comunidades del Camino Real, donde el uso de fosas sépticas incrementa el riesgo de infiltración de compuestos nitrogenados en fuentes subterráneas.

Este estudio surge ante la carencia de reportes experimentales que confirmen la aplicabilidad del método en condiciones reales de laboratorio. La verificación propuesta contribuye al cumplimiento normativo y fortalece los análisis en aguas, a fin de garantizar datos confiables para la toma de decisiones en salud pública, calidad del agua y seguridad alimentaria.

METODOLOGÍA

La investigación se llevó a cabo en un laboratorio especializado en el análisis de agua potable, con el propósito de validar la implementación adecuada del método estandarizado para la cuantificación de nitrógeno amoniacal, conforme a los criterios técnicos establecidos en la norma NMX-AA-115-SCFI-2015. La verificación del método se realizó bajo condiciones controladas, asegurando el cumplimiento riguroso de los parámetros operativos definidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, que regula la calidad del agua destinada al consumo humano.

Preparación de soluciones

Para la preparación de las soluciones patrón se empleó cloruro de amonio (NH_4Cl) de grado analítico, previamente secado a 100°C durante una hora para asegurar su estabilidad. La solución madre, con una concentración de 1000 mg/L de nitrógeno amoniacal, se elaboró disolviendo la sal en agua desionizada y aforando a un volumen final de un litro. A partir de esta solución, se generaron diluciones sucesivas para obtener estándares de trabajo. Las soluciones se almacenaron en frascos ámbar, previamente acidificados con ácido sulfúrico para ajustar el pH a 2, a fin de preservar la integridad del analito.

Implementación y verificación de un método selectivo para la determinación de nitrógeno amoniacal en agua destinada al consumo humano

El análisis instrumental se llevó a cabo mediante un electrodo selectivo de ion amonio, previamente calibrado y acoplado a un potenciómetro de alta sensibilidad. Antes de cada medición, se acondicionó el electrodo y se verificó la estabilidad del potencial eléctrico. Las muestras y soluciones patrón fueron alcalinizadas con hidróxido de sodio en presencia de EDTA, permitiendo la liberación del ion amonio. Posteriormente, se registraron los valores de potencial en milivoltios (mV), que se emplearon para determinar las concentraciones de nitrógeno amoniacal en las muestras evaluadas.

Curva de calibración

La construcción de la curva de calibración se llevó a cabo mediante análisis de regresión lineal. Se graficó el potencial eléctrico registrado vs el logaritmo de la concentración del ion amonio expresado como nitrógeno amoniacal. Este procedimiento permitió evaluar la respuesta analítica del electrodo selectivo de amonio bajo las condiciones experimentales establecidas. Para validar la linealidad del sistema, se empleó el coeficiente de determinación (R^2) como criterio estadístico; se consideró como aceptable un valor igual o superior a 0.995, de acuerdo con lo que se establece en la norma NMX-AA-115-SCFI-2015. Este parámetro es esencial para garantizar la precisión y exactitud en la cuantificación de nitrógeno amoniacal en muestras de agua destinadas a consumo humano.

Verificación del método

Con el propósito de validar la idoneidad del método analítico propuesto para la cuantificación de nitrógeno amoniacal, se llevaron a cabo evaluaciones de los principales parámetros de desempeño, como se establece en la norma NMX-AA-115-SCFI-2015. La verificación de la linealidad se basó en la construcción de una curva de calibración utilizando estándares preparados a partir de diluciones seriadas, valorada mediante el coeficiente de determinación (R^2), tomando como valor aceptable un valor igual o superior a 0.995.

La exactitud del método se estimó mediante ensayos de recuperación realizados con muestras fortificadas. Lo anterior permitió cuantificar la capacidad del procedimiento para medir con precisión el analito en presencia de la matriz. La reproducibilidad interdiaria se evaluó mediante la realización de diez determinaciones distribuidas en dos días consecutivos, y se calculó el coeficiente de variación (CV) para determinar la estabilidad del método en diferentes sesiones analíticas.

Adicionalmente, se aplicó la prueba estadística F de Fisher con el objetivo de contrastar las varianzas entre series, garantizando así la homogeneidad de los datos bajo condiciones analíticas controladas. Los resultados obtenidos se confrontaron con los criterios de aceptación establecidos en la normativa oficial, confirmando la aplicabilidad del método en las condiciones operativas del laboratorio.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Curva de calibración y linealidad

La curva de calibración se construyó utilizando soluciones estándar de cloruro de amonio con concentraciones nominales de 0.1, 0.5, 1, 10, 100 y 1000 mg/L. Las mediciones potenciométricas se realizaron con un electrodo selectivo de ion amonio calibrado con soluciones buffer de pH 4.00 y 7.00.

Los valores de milivoltios (mV) obtenidos para cada estándar mostraron una respuesta decreciente conforme aumentó la concentración. Estos resultados siguieron la tendencia de la ecuación de Nernst para electrodos selectivos. El ajuste de los datos se realizó mediante una regresión lineal logarítmica, obteniéndose la ecuación (1):

$$y = -54.3570 \ln(x) - 24.8580 \quad (1)$$

Donde y denota el potencial en mV, x denota a la concentración de ion amonio en mg/L.

Implementación y verificación de un método selectivo para la determinación de nitrógeno amoniacal en agua destinada al consumo humano

El coeficiente de correlación obtenido fue de 0.9996, y su coeficiente de determinación R^2 fue de 0.9992. Estos resultados (ver tabla 1) muestran una linealidad en todo el intervalo evaluado. Estos valores están por arriba del criterio de aceptación mínimo que se establece en la norma que debe ser $R \geq 0.997$ para métodos de análisis cuantitativo. La linealidad se mantuvo constante incluso en los extremos del intervalo evaluado, desde concentraciones de 0.1 mg/L hasta niveles elevados de 1000 mg/L. Lo anterior indica que el método es aplicable para una amplia gama de concentraciones sin necesidad de realizar diluciones adicionales o ajustes por sensibilidad del equipo.

En cuanto al porcentaje de recuperación, los valores obtenidos para los estándares dentro de la curva oscilaron entre 92.29 % y 116.90 %, encontrándose todos dentro del intervalo aceptable de 80 % a 120 %. Esto respalda la fidelidad del electrodo y la precisión en la preparación de los patrones. Además, se observó que el potencial eléctrico mantenía una relación logarítmica coherente con la concentración, sin presencia de puntos atípicos ni desviaciones sistemáticas.

Los resultados permiten confirmar que la curva de calibración desarrollada es estadísticamente válida y cumple con los criterios de aceptación exigidos para su uso en análisis rutinarios de nitrógeno amoniacal en agua potable.

Tabla 1. Valores de potencial eléctrico obtenidos para soluciones estándar de ion amonio y su correspondiente concentración logarítmica.

Concentración (mg/L)	Potencial (mV)
0.1	-100.1
0.5	-115.5
1	-120.3
10	-145.2
100	-177.9
1000	-206.6

De acuerdo con el criterio de aceptación del coeficiente de correlación debe de ser ≥ 0.997 y el % de Recobro de 80-120. La curva realizada se aceptó, esto, se puede apreciar en la siguiente figura 1 y los resultados de las lecturas de los análisis de los estándares en la tabla 2.

La curva de calibración construida a partir de los estándares mostró un coeficiente de correlación de 0.9996, cumpliendo con el criterio de aceptación (≥ 0.997). El porcentaje de recuperación osciló entre 92.29 % y 116.90 %, dentro del intervalo aceptable de 80-120 %.

Implementación y verificación de un método selectivo para la determinación de nitrógeno amoniacal en agua destinada al consumo humano

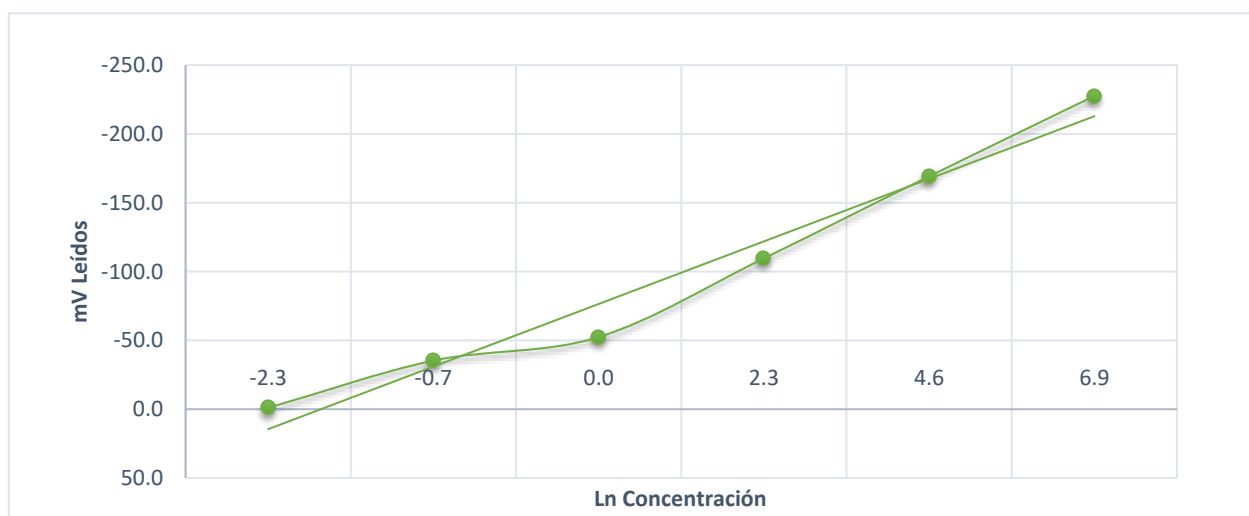


Figura 1. Curva de calibración del electrodo selectivo de ion amonio.

Recuperación y sesgo

Los estudios de recuperación y sesgo se realizaron con el objetivo de evaluar la exactitud del método de determinación de nitrógeno amoniacal mediante electrodo selectivo, de acuerdo con la norma NMX-AA-115-SCFI-2015. Para ello, se prepararon soluciones estándar con concentraciones crecientes de ion amonio, y se midieron los potenciales eléctricos generados por el electrodo, así como los porcentajes de recuperación obtenidos.

Los valores de recuperación calculados para cada punto de la curva oscilaron entre 92.29 % y 116.90 %, con un promedio general de 100.39 %, lo que indica una alta fidelidad en la cuantificación del analito a lo largo de todo el intervalo de concentraciones evaluado (ver tabla 2). En todos los casos, los valores se mantuvieron dentro del intervalo de aceptación definido por la norma (80 % a 120 %). Los resultados anteriores confirman la validez del método en términos de exactitud. El valor más alto se obtuvo con la concentración más baja (0.1 mL), con un 116.90 % de recuperación, lo cual es aceptable considerando las posibles variaciones en niveles traza. En contraste, los estándares de concentración media y alta presentaron recuperaciones más cercanas al 100 %, lo que sugiere una respuesta más estable del electrodo en dichas condiciones.

El sesgo, entendido como la diferencia entre el valor teórico esperado y el valor obtenido experimentalmente, fue mínimo en todos los niveles de concentración, indicando que el método no presenta desviaciones sistemáticas significativas. Esta ausencia de sesgo refuerza la confiabilidad del método y su aplicabilidad en condiciones rutinarias de laboratorio.

Los resultados obtenidos muestran que el método cumple con los criterios establecidos por la legislación mexicana vigente y también ofrece un desempeño analítico comparable al de métodos de referencia internacionales.

Implementación y verificación de un método selectivo para la determinación de nitrógeno amoniacal en agua destinada al consumo humano

Tabla 2. Respuesta potenciométrica del electrodo selectivo de ion amonio y valores de recuperación para los estándares de calibración.

Vol. Patrón (ml)	Ln de conc.	mV Leídos	% Recobro
0	-----	12.2	-----
0.1	-2.3	-1.0	116.90
0.5	-0.7	-35.3	92.91
1	0.0	-52.4	92.43
10	2.3	-109.6	92.29
100	4.6	-169.2	101.49
1000	6.9	-227.6	106.35
			100.39

Repetibilidad y reproducibilidad

La evaluación de la repetibilidad y reproducibilidad del método se llevó a cabo con el fin de comprobar su precisión en diferentes condiciones operativas (ver tabla 3). La repetibilidad se determinó mediante la medición de muestras replicadas por un mismo analista, en un mismo equipo y bajo las mismas condiciones experimentales, mientras que la reproducibilidad se evaluó considerando variaciones entre analistas y días de trabajo, empleando el mismo procedimiento analítico. Ambas pruebas se realizaron utilizando una solución patrón de 10 mg/L de ion amonio como muestra de referencia.

Los resultados obtenidos para la repetibilidad mostraron una desviación estándar relativa (coeficiente de variación, CV) inferior al 5 %, con valores consistentes entre las réplicas, lo que indica un comportamiento preciso y confiable del electrodo selectivo en condiciones controladas. Este resultado cumple con el criterio establecido por la NMX-AA-115-SCFI-2015, que establece como aceptable un $CV \leq 15 \%$ para este tipo de análisis.

Por otro lado, la reproducibilidad presentó una ligera variabilidad atribuible al cambio de operador y de día de análisis, pero manteniéndose dentro de los límites permisibles. El coeficiente de variación interdiario fue igualmente inferior al 5 %, confirmando que el método conserva su precisión aún bajo condiciones variables. Esta estabilidad es crucial para su implementación en laboratorios de ensayo que trabajan bajo acreditación ISO/IEC 17025, donde la robustez del método es un requisito fundamental para garantizar la trazabilidad y la confiabilidad de los resultados.

La baja dispersión de los datos obtenidos en ambas evaluaciones respalda la capacidad del electrodo selectivo de ion amonio para producir resultados precisos de manera consistente, sin dependencia significativa de factores externos. Además, la prueba F de Fisher aplicada a las varianzas obtenidas entre ambos días indicó que no existieron diferencias significativas ($p > 0.05$), lo cual valida la estabilidad del método frente a variaciones menores en el tiempo. Esta consistencia es fundamental en contextos de control de calidad del agua potable, donde la precisión analítica impacta directamente en la toma de decisiones sanitarias y regulatorias. Estos resultados fortalecen la viabilidad del método como herramienta analítica confiable en el monitoreo de nitrógeno amoniacal en agua para consumo humano.

Implementación y verificación de un método selectivo para la determinación
 de nitrógeno amoniacal en agua destinada al consumo humano

Tabla 3. Resultados de la concentración de nitrógeno amoniacal obtenidos durante la evaluación de la reproducibilidad interdiaria del método.

Día 1 (mg/L)	Día 2 (mg/L)
5.265	5.018
5.06	5.182
5.147	5.095
5.336	5.015
5.28	5.055
4.853	5.042
5.143	5.187
4.977	4.974
4.985	5.039
5.062	4.893
5.265	5.018

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

El método basado en electrodo selectivo de ion amonio demostró ser preciso para la determinación de nitrógeno amoniacal en agua potable, cumpliendo con los criterios establecidos por la NOM-127-SSA1-2021 y la NMX-AA-115-SCFI-2015. La curva de calibración presentó excelente linealidad, las recuperaciones estuvieron dentro del intervalo aceptable y los coeficientes de variación fueron inferiores al 5 %. Los resultados aportan evidencia técnica que respalda el uso de este método en análisis de calidad del agua como alternativa segura, económica y confiable. Además, se contribuye al fortalecimiento de los análisis en los sistemas de vigilancia sanitaria del agua en contextos vulnerables.

REFERENCIAS

- Belezia, L. C., & de Almeida, M. F. L. (2021). Self-assessment model for testing and calibration laboratories based on ISO/IEC 17025: 2017 requirements. *Journal of Physics: Conference Series*,
- Camargo, J. A., & Alonso, Á. (2006). Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. *Environment International*, 32(6), 831-849. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.05.002>
- Chen, G.-H., van Loosdrecht, M. C., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. (2020). *Biological wastewater treatment: principles, modeling and design*. IWA publishing.
- Guideline, I. H. T. (2005). Validation of analytical procedures: text and methodology. *Q2 (R1)*, 1(20), 05.
- Huff, L., Delos, C., Gallagher, K., & Beaman, J. (2013). Aquatic life ambient water quality criteria for ammonia-freshwater. *Washington DC: US Environmental Protection Agency*.
- Lin, C., Liu, Y., Li, Y.-Y., & Liu, J. (2025). A novel mainstream partial nitrification process by ex-situ high salinity NOB inhibition: long-term stability and microbial response. *Journal of*

Implementación y verificación de un método selectivo para la determinación
de nitrógeno amoniacal en agua destinada al consumo humano

Environmental Management, 392, 126867.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126867>

Nollet, L. M., & De Gelder, L. S. (2000). *Handbook of water analysis*. CRC press.

Organization, W. H. (2004). *Guidelines for drinking-water quality* (Vol. 1). World health organization.

Yun, L., Yu, Z., Li, Y., Luo, P., Jiang, X., Tian, Y., & Ding, X. (2019). Ammonia nitrogen and nitrite removal by a heterotrophic *Sphingomonas* sp. strain LPN080 and its potential application in aquaculture. *Aquaculture*, 500, 477-484.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.10.054>

Zhang, Y., Ding, Y., Fu, Y., Wu, X., Bao, L., & Yang, Q. (2025). Performance enhancement of shortcut nitrification-denitrification in an activated sludge system under high-frequency intermittent aeration strategy. *Environmental Technology & Innovation*, 40, 104496.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104496>

