ISSN: 2415-2882
AGROECOSISTEMAS
REVISTA PARA LA TRANSFORMACIÓN AGRARIA SOSTENIBLE

Evaluación de Bacillus spp. para el control de NH_3 en el cultivo de camarón

Evaluation of Bacillus spp. for the control of NH_3 in shrimp farming

Recibido: 13/07/26
Aceptado: 26/08/26
Publicado: 10/09/26

Leonor Margarita Rivera Intriago[1]*
E-mail: lrivera@utmachala.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9407-1525
Ana Belén Romero Maldonado[1]
E-mail: aromero6@utmachala.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4963-1002
Geraldine Gissele Matamoros Romero[1]
E-mail: gmatamoro2@utmachala.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5115-1490
Rigoberto García Batista[1]
E-mail: rmgarcia@utmachala.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2403-0135

[1]Universidad Técnica de Machala, Machala, El Oro, Ecuador.
*Autor para correspondencia

Cita sugerida (APA, séptima edición)
Rivera Intriago, L. M; Romero Maldonado, A.B; Matamoros Romero, G.G; García Batista, Rigoberto (2026). Evaluación de Bacillus spp. para el control de NH_3 en el cultivo de camarón. *Revista Científica Agroecosistemas, 14*, e855. http://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/855

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de un consorcio comercial de Bacillus spp. en la reducción de amoniaco no ionizado (NH_3) y describir su relación con la dinámica de parámetros fisicoquímicos del agua (pH, temperatura y salinidad) bajo condiciones controladas. Se emplearon 12 unidades experimentales (4 L) con agua proveniente de un sistema de cultivo de camarón, distribuidas en cuatro tratamientos con tres réplicas: control (sin producto), T_1 (dosis recomendada comercialmente: 0,12 mg 4 L^{-1}), T_2 (0,60 mg 4 L^{-1}) y T3 (0,18 mg 4 L^{-1}). El sistema fue inducido mediante adición de NH_4Cl hasta una concentración inicial de 5,0 ppm de NH_3; se añadió melaza como fuente de carbono al consorcio de Bacillus spp. para activarlas. La concentración de NH_3 se estimó a partir de la medición colorimétrica de amonio y la tabla de equilibrio de Emerson et al. (1975). Tras 8 días, T_1 y T_3 redujeron el NH_3 a 0,02 y 0,01 ppm (reducciones de 99,6% y 99,8%), mientras que T_2 mostró una disminución limitada (4,01 ppm) y el control permaneció en 5,0 ppm. La temperatura (≈28 °C) y la salinidad (≈32 ppt) se mantuvieron estables; el pH aumentó desde 7,4, estabilizándose alrededor de 8,2 en T_1 y T_3. Los resultados sugieren que consorcios basados en Bacillus spp. pueden contribuir al control del NH_3 cuando se aplican al menos a la dosis recomendada, acompañados de monitoreo de pH y estrategias complementarias de manejo.

Palabras clave:

Bacillus spp., Amoniaco, Biorremediación, Calidad del agua, Acuicultura.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the efficiency of a commercial Bacillus spp. consortium in reducing non-ionized ammonia (NH_3) and to describe its relationship with the dynamics of the water's physicochemical parameters (pH, temperature, and salinity) under controlled conditions. Twelve experimental units (4 L) were used, containing water from a shrimp farming system. These units were distributed across four treatments with three replicates each: control (no product), T^1 (commercially recommended dose: 0.12 mg 4 L^{-1}), T^2 (0.60 mg 4 L^{-1}), and T^3 (0.18 mg 4 L^{-1}). The system was induced by adding NH_4Cl to an initial concentration of 5.0 ppm of NH_3. Molasses was added as a carbon source to the Bacillus spp. consortium to activate it. The NH_3 concentration was estimated from colorimetric ammonium measurements and the equilibrium table of Emerson et al. (1975). After 8 days, T_1 and T_3 reduced NH_3 to 0.02 and 0.01 ppm (reductions of 99.6% and 99.8%), respectively, while T2 showed a limited decrease (4.01 ppm) and the control remained at 5.0 ppm. Temperature (≈28 °C) and salinity (≈32 ppt) remained stable; pH increased from 7.4, stabilizing at around 8.2 in T_1 and T_3. The results suggest that Bacillus spp.-based consortia can contribute to NH_3 control when applied at least at the recommended dose, accompanied by pH monitoring and complementary management strategies.

Keywords:

Bacillus spp., Ammonia, Bioremediation, Water quality, Aquaculture.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0

INTRODUCCIÓN

La camaronicultura, se ha consolidado como una de las actividades acuícolas de mayor importancia económica y social a nivel mundial, especialmente en regiones tropicales y subtropicales. En países productores como Ecuador, el cultivo de camarón representa uno de los principales rubros de exportación no petrolera y constituye una fuente relevante de empleo e ingresos para amplios sectores de la población vinculados a la cadena productiva acuícola (Piedrahita, 2003; Food and Agriculture Organization/FAO, 2022). El crecimiento sostenido de esta actividad ha impulsado la adopción de sistemas de cultivo cada vez más intensivos, orientados a maximizar la productividad y responder a la creciente demanda internacional.

No obstante, la intensificación de los sistemas de cultivo ha traído consigo importantes desafíos ambientales y productivos, entre los cuales destaca el manejo de la calidad del agua. La acumulación de residuos orgánicos, el aumento de la carga alimenticia y el metabolismo de los organismos cultivados favorecen la generación de compuestos nitrogenados que, si no son controlados adecuadamente, pueden comprometer la estabilidad del sistema y el bienestar de los camarones (Sedano & Anguis, 2016; Boyd, 2020). Por lo manifestado, el monitoreo y control de los parámetros fisicoquímicos del agua se consideran aspectos fundamentales para garantizar la sostenibilidad de los sistemas acuícolas.

Entre los compuestos nitrogenados presentes en los estanques de cultivo, el amoniaco no ionizado (NH_3) es reconocido como uno de los más tóxicos para los organismos acuáticos (tabla 1). Su presencia en concentraciones elevadas puede provocar alteraciones fisiológicas, estrés crónico, disminución del crecimiento y aumento de la susceptibilidad a enfermedades, lo que se traduce en pérdidas productivas y económicas significativas (Gogoi et al., 2021; Romero et al., 2020). La acumulación de amoniaco en los sistemas de cultivo está asociada principalmente a la descomposición de la materia orgánica, la excreción nitrogenada de los camarones y la degradación del alimento no consumido (Nagaraju et al., 2023).

Tabla 1. Valores de Amonio no ionizado y su efecto en el camarón

NH_3 (mg/L)	Nivel de riesgo	Efectos en el camarón
< 0,01	Seguro	Condición normal, sin estrés fisiológico
0,01 – 0,05	Subletal	Estrés, reducción del crecimiento y eficiencia alimenticia
0,05 – 0,10	Peligroso	Daño branquial, disminución del consumo de alimento
> 0,10	Altamente tóxico	Mortalidad aguda y colapso del cultivo

Fuente: Elaboración propia en base a Boyd, C. E. (2020); Gogoi et al., (2021); Romero et al., (2020)

La toxicidad del amoniaco en ambientes acuáticos depende de estrechamente de factores como el pH, la temperatura y la salinidad, los cuales determinan el equilibrio químico entre la forma ionizada (NH_4^+), considerada menos tóxica, y la forma no ionizada (NH_3), altamente perjudicial para los organismos acuáticos (Harlina et al., 2022). En sistemas de cultivo de camarón, variaciones en el pH hacia valores alcalinos pueden favorecer el incremento de la fracción de NH_3, aumentando el riesgo de efectos adversos sobre la salud y supervivencia de los organismos cultivados (Hernández et al., 2022; Lin & Chen, 2019).

Tradicionalmente, el control del amoniaco en la acuicultura se ha basado en estrategias como el recambio parcial de agua, el incremento de la aireación y el uso de productos químicos. Si bien estas prácticas pueden resultar efectivas en determinadas condiciones, presentan limitaciones importantes desde el punto de vista ambiental y económico, especialmente en sistemas intensivos donde el consumo de agua y energía es elevado (Shivalkar et al., 2021). Además, el uso indiscriminado de compuestos químicos puede generar impactos negativos sobre el ecosistema acuático y afectar el microbiota natural del sistema (Badiola et al., 2018).

Ante estas limitaciones, la biorremediación mediante el uso de microorganismos ha emergido como una alternativa sostenible para el manejo de la calidad del agua en sistemas acuícolas. Este enfoque se basa en la capacidad metabólica de ciertos microorganismos para transformar, inmovilizar o eliminar compuestos contaminantes, contribuyendo a la estabilidad del sistema y reduciendo la dependencia de prácticas convencionales de alto impacto ambiental (Wei et al., 2022). La aplicación de microorganismos benéficos se alinea con los principios de la acuicultura sostenible y la producción responsable.

Dentro de los microorganismos utilizados con fines de biorremediación, las bacterias del género ***Bacillus*** spp. han recibido especial atención debido a sus múltiples ventajas funcionales. Estas bacterias presentan una elevada capacidad para degradar materia orgánica, participar activamente en el ciclo del nitrógeno y producir enzimas extracelulares que facilitan la mineralización de residuos presentes en el agua y los sedimentos (Soltani et al., 2019). De igual manera, su capacidad para formar esporas les confiere resistencia a condiciones ambientales adversas, lo que favorece su supervivencia y eficacia en sistemas acuícolas (Garcés, 2022).

Diversos estudios han demostrado que la aplicación de ***Bacillus*** spp. en sistemas de cultivo puede contribuir a la reducción de amoniaco, la estabilización del pH y la mejora general de la calidad del agua, además de ejercer efectos positivos sobre la salud de los organismos cultivados (John et al., 2020). En particular, el uso de consorcios microbianos o multicepas ha mostrado una mayor eficiencia en comparación con la aplicación de cepas individuales, debido a la complementariedad metabólica y a la diversidad funcional de los microorganismos involucrados (Ipsita et al., 2020; Prasenjit et al., 2017).

La efectividad de los consorcios de ***Bacillus*** spp. está influenciada por diversos factores, entre los que destacan la dosificación, la frecuencia de aplicación y las condiciones fisicoquímicas del medio. Estudios previos señalan que el pH y la temperatura del agua juegan un papel determinante en la actividad metabólica de estas bacterias, afectando directamente su capacidad para reducir compuestos nitrogenados como el amoniaco (Jiménez-Delgadillo et al., 2018). Un manejo inadecuado de estos parámetros puede limitar la eficiencia del proceso de biorremediación y disminuir los beneficios esperados.

A pesar de los avances en el uso de consorcios microbianos en acuicultura, aún existe la necesidad de generar información experimental que permita evaluar su eficiencia bajo diferentes dosificaciones y condiciones controladas, particularmente en sistemas de cultivo de camarón. En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo a analizar la eficiencia de consorcios de ***Bacillus*** spp. en la reducción de amoniaco no ionizado (NH_3) y su efecto sobre la estabilidad de los parámetros fisicoquímicos del agua en sistemas de cultivo de camarón. En la figura 1 se ilustra como ***Bacillus*** spp, a través de consorcios multicepas degradan materia orgánica, participante en el ciclo del nitrógeno y producen enzimas extracelulares contribuye a disminuir el amonio no ionizado (NH3) en el sistema.

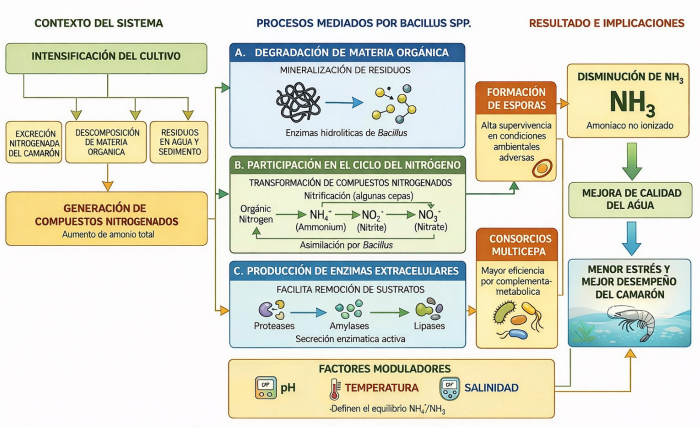
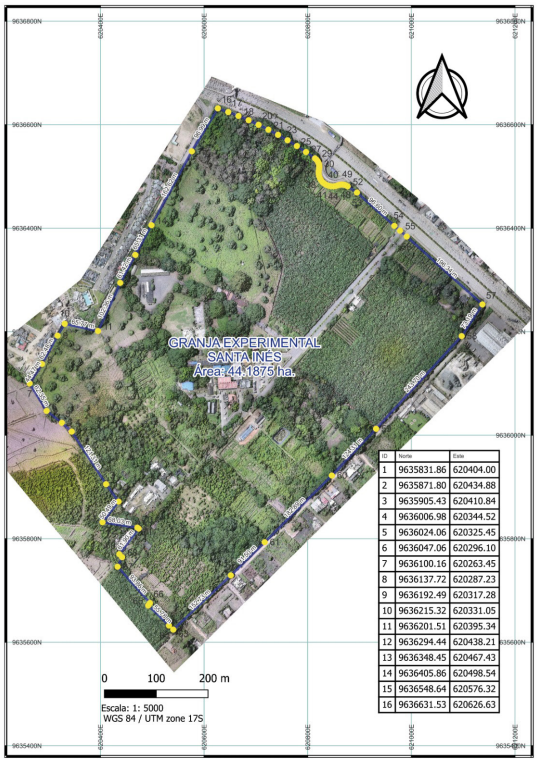


Fig. 1: Acción de Bacillus spp. en la reducción de NH_3 en sistemas de cultivo de camarón

Fuente: Elaboración con IA.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo experimental se realizó en el Laboratorio de Maricultura, dentro de las instalaciones de la Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA) de la "Universidad Técnica de Machala" en el cantón Machala-Provincia de El Oro -Ecuador.



ID	Norte	Este
1	9635831.86	620404.00
2	9635871.80	620434.88
3	9635905.43	620410.84
4	9636006.98	620344.52
5	9636024.06	620325.45
6	9636047.06	620296.10
7	9636100.16	620263.45
8	9636137.72	620287.23
9	9636192.49	620317.28
10	9636215.32	620331.05
11	9636201.51	620395.34
12	9636294.44	620438.21
13	9636348.45	620467.43
14	9636405.86	620498.54
15	9636548.64	620576.32
16	9636631.53	620626.63

Fig. 2: Ubicación del Área experimental, UTMACH – FCA **Fuente:** Google Earth (2026)

Diseño experimental

La investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental, empleando un diseño completamente al azar. Se utilizaron doce unidades experimentales distribuidas en cuatro tratamientos, cada uno con tres repeticiones. Los tratamientos incluyeron un grupo control sin aplicación del consorcio de ***Bacillus*** y tres tratamientos con diferentes dosificaciones de un producto comercial formulado a base de consorcios de ***Bacillus*** spp.: T_1 (dosis recomendada comercialmente: 0,12 mg $4L^{-1}$), T_2 (0,6 mg $4L^{-1}$) y T_3 (0,18 mg $4L^{-1}$).

Se utilizaron recipientes plásticos con un volumen útil de 4 L, llenados con agua proveniente de un sistema de cultivo de camarón. Para simular una condición crítica de calidad de agua, se indujo el sistema mediante la adición de cloruro de amonio (NH_4Cl) hasta alcanzar una concentración inicial de 5,0 ppm de NH_3. Se añadió melaza (1 mL por unidad experimental) como fuente de carbono.

Aplicación del consorcio microbiano

El consorcio microbiano evaluado estuvo constituido por siete cepas del género ***Bacillus***: ***pumilus, polimyxa; subtilis, licheniformis, megaterium, coagulans, clausal***

(concentración aproximada de 5 × 10^9 UFC g^{-1}), seleccionadas por su potencial para contribuir a la remoción/transformación de compuestos nitrogenados y materia orgánica. La aplicación del producto se realizó directamente al agua de cada unidad experimental, de acuerdo con la dosificación asignada a cada tratamiento.

Monitoreo de parámetros fisicoquímicos

Durante el periodo experimental se monitorearon temperatura, pH, salinidad y la concentración de amoniaco no ionizado (NH_3). La temperatura y el pH se midieron diariamente con equipos portátiles calibrados, y la salinidad se determinó con refractómetro. El amonio se cuantificó por método colorimétrico utilizando un Checker HC (HI715) y reactivos HI715-25; posteriormente se estimó la fracción no ionizada (NH_3) mediante la tabla de equilibrio amoníaco/amonio en función de pH y temperatura propuesta por Emerson et al (1975).

Procedimiento estadístico

Para conocer si se presentan o no diferencias estadísticas significativas entre las dosis de los consorcios bacterianos de ***Bacillus*** en función del contenido de amoniaco se realizó un análisis de varianza de un factor intergrupos, previo cumplimiento a los supuestos de normalidad de datos (verificado con el test de Shapiro Wilks) y homogeneidad de varianzas (verificado con el test de Levene). En caso de presentarse diferencias entre los consorcios bacterianos se aplicó la prueba de rangos y comparaciones múltiples de Tukey en función de determinar dónde se encuentran diferencias o similitudes.

El procesamiento estadístico de los datos obtenidos en el estudio se efectuó mediante el software SPSS Versión 25 de prueba para Windows, con una confiabilidad en la estimación del 95 % (alfa=0,05).

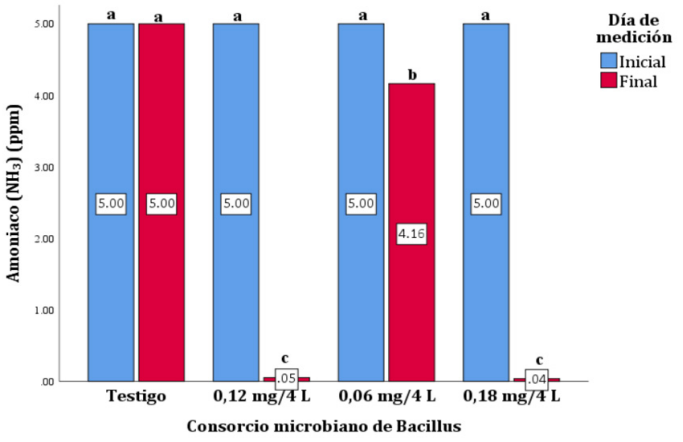


Fig. 3: Concentración de amoniaco no ionizado (NH_3) por consorcio de Bacillus spp. al inicio y final del experimento.

*Letras diferentes entre las dosis de B*acillus* spp. al inicio y final del experimento en relación con la concentración de amoniaco indican diferencias estadísticas significativas para un p-valor≤0,05 (según prueba de Tukey).

Los resultados respaldan el potencial de consorcios basados en ***Bacillus*** spp. para contribuir al control de compuestos nitrogenados y mejorar la calidad del agua, en concordancia con reportes sobre probióticos del género ***Bacillus*** y consorcios multicepas en sistemas acuícolas (Soltani et al., 2019; Ipsita et al., 2020; Wei et al., 2022). En particular, las concentraciones finales obtenidas en T_1 y T_3 (0,02–0,01 ppm) se ubicaron dentro del rango subletal (0,01–0,05 ppm) descrito en la Tabla 1, lo que reduce el riesgo fisiológico para el camarón en comparación con el control.

Desde el punto de vista funcional, ***Bacillus*** spp. puede aportar a la reducción del amonio a través de varios mecanismos: a) degradación de materia orgánica y reducción de la demanda bioquímica, b) incorporación de nitrógeno a biomasa microbiana, c) estimulación de rutas de nitrificación/transformación en el microbioma del sistema y d) sinergia con estrategias físicas como la adsorción en zeolita. Por ello, además de la dosificación, es clave acompañar la aplicación con monitoreo de pH y buenas prácticas de manejo (aireación, recambios o control de alcalinidad) para evitar incrementos que favorezcan la fracción no ionizada (NH_3).

Tabla 2. Concentración promedio de amoniaco no ionizado (NH_3) por tratamiento.

Tratamientos	Dosis	NH_3 inicial (ppm)	NH_3 final (ppm)
Control	—	5,00a	5,00a
T_1	0,12 mg 4 L^{-1}	5,00a	0,02b
T_2	0,06 mg 4 L^{-1}	5,00a	4,01a
T_3	0,18 mg 4 L^{-1}	5,00a	0,01b

*Letras diferentes entre las dosis de Bacillus spp. al inicio y final del experimento en relación con la concentración de amoniaco indican diferencias estadísticas significativas para un p-valor≤0,05 (según prueba de Tukey).

Durante el experimento, se mantuvieron estables los factores físicos, con valores promedios de temperatura del agua de 28 °C y salinidad de 32 ppt. Sin embargo, el pH presentó variaciones (Figura 3): inició en 7,4 y aumentó hasta aproximadamente 8,2 hacia el día 3; posteriormente, T_1 y T_3 se estabilizaron alrededor de 8,2, mientras que el control y T2 continuaron incrementándose hasta aproximadamente 9,0 hacia el día 7. Dado que valores alcalinos favorecen la fracción no ionizada (NH_3) frente a NH_4^+ y aumentan el riesgo de toxicidad, el monitoreo y ajuste del pH es importante durante la aplicación de consorcios microbianos (Boyd, 2020; Lin & Chen, 2019; Gogoi et al., 2021).

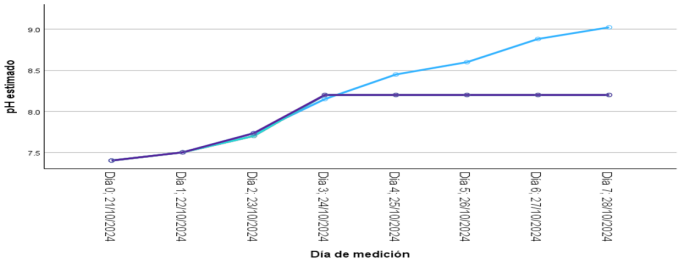


Fig. 3: Comportamiento del pH durante el experimento.

Nota. La línea azul celeste representa al control y T_2. La línea azul representa al T_1 y T_2.

En conjunto, los tratamientos con dosis recomendada y superior (T_1 y T_3) mostraron el mejor desempeño en la

reducción del NH_3, mientras que la dosis de T2 no logró un control efectivo bajo las condiciones del ensayo. La dinámica del pH sugiere la necesidad de acompañar la aplicación del producto con medidas de control para mantener el sistema dentro de rangos favorables, lo cual coincide con lo descrito por Harlina et al. (2022) y Hernández et al. (2022). En consecuencia, el uso de consorcios microbianos de ***Bacillus*** spp. se perfila como una alternativa potencialmente sostenible para el manejo de la calidad del agua, siempre que se optimice la dosificación y el control de variables fisicoquímicas.

CONCLUSIONES

Se concluye bajo las condiciones evaluadas, que los consorcios de ***Bacillus*** spp. representan una alternativa prometedora para el manejo del amonio en sistemas de cultivo de camarón. Se recomienda validar estos resultados a escala de producción e incorporar indicadores adicionales (como oxígeno disuelto y TAN) para una evaluación integral de la calidad del agua, fortalecimiento la aplicación de buenas prácticas acuícolas ambientalmente responsables.

Conflicto de Intereses:

Los autores de este artículo no presentan conflicto de intereses.

Contribuciones de los autores:

Leonor Margarita Rivera Intriago: Redacción del borrador original, Metodología, Investigación, Estadística, Curación de datos.

Ana Belén Romero Maldonado; Geraldine Gissele Matamoros Romero; Rigoberto García Batista: Redacción del borrador original, Metodología, Investigación, Estadística, Curación de datos,

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Badiola, M., Mendiola, D., & Bostock, J. (2018). Recirculating aquaculture systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. Aquacultural Engineering, 81, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.01.004

Boyd, C. E. (2020). Water quality: An introduction. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23335-8.

Emerson, K., Russo, R. C., Lund, R. E., & Thurston, R. V. (1975). Aqueous ammonia equilibrium calculations: effect of pH and temperature. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 32(12), 2379–2383. https://doi.org/10.1139/f75-274

Food and Agriculture Organization/FAO. (2022). The state of world fisheries and aquaculture 2022: Towards blue transformation. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://doi.org/10.4060/cc0461en

Garcés, S. (2022). Acumulación de sólidos, un aspecto crítico en los sistemas acuícolas intensivos: alternativas para una gestión sostenible. ***Orinoquia***, ***26***(1), 53–64. https://doi.org/10.22579/20112629.731

Gogoi, P., Debnath, C., & Choudhury, T. (2021). Ammonia toxicity in aquaculture systems: Impacts and mitigation strategies. Aquaculture International, 29(2), 721–735. https://doi.org/10.1007/s10499-020-00642-4

Harlina, S., Widodo, M., & Pratiwi, D. (2022). Effect of pH on ammonia toxicity in aquatic organisms. Environmental Science and Pollution Research, 29, 45678–45689. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19567-3

Hernández, L., Torres, J., & Martínez, P. (2022). Physiological stress responses of shrimp exposed to ammonia under farming conditions. Aquaculture Reports, 23, 101047. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2022.101047

Ipsita, S., Mishra, S., & Dash, B. (2020). Role of microbial consortia in improving aquaculture water quality. Journal of Cleaner Production, 258, 120724. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120724

Jiménez-Delgadillo, B., Ramírez, J., & Flores, M. (2018). Environmental factors affecting Bacillus activity in aquaculture systems. Aquaculture Engineering, 82, 13–20. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.04.002

John, E. M., Smith, R., & Thomas, P. (2020). Multistrain probiotics for water quality improvement in shrimp culture systems. Aquaculture Research, 51(9), 3682–3691. https://doi.org/10.1111/are.14726

Lin, Y. C., & Chen, J. C. (2019). Effects of ammonia on growth and immune responses of shrimp. Fish & Shellfish Immunology, 86, 589–596. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2018.12.016

Nagaraju, V., Reddy, A., & Kumar, S. (2023). Nitrogen dynamics and ammonia management in shrimp farming systems. Journal of Environmental Management, 325, 116492. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116492

Piedrahita, R. H. (2003). Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. Aquaculture, 226(1–4), 35–44. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00465-4

Prasenjit, M., Sukanta, D., & Pradip, D. (2017). Synergistic effects of bacterial consortia on nitrogen removal. Ecological Engineering, 103, 21–29. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.03.014

Romero, J., Feijoo, C. G., & Navarrete, P. (2020). Antibiotics in aquaculture – Use, abuse and alternatives. ***Frontiers in Microbiology***, 11, 171. https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00171

Sedano, J., & Anguis, V. (2016). Water quality management in intensive aquaculture systems. ***Reviews in Aquaculture, 8***(4), 389–403. https://doi.org/10.1111/raq.12107

Shivalkar, P., Nirmale, A., & Pawar, S. (2021). Sustainable strategies for water quality management in aquaculture. *Environmental Technology & Innovation, 22*, 101411. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101411

Soltani, M., Ghosh, K., Hoseinifar, S. H., Kumar, V., Lymbery, A. J., & Roy, S. (2019). Genus Bacillus, promising probiotics in aquaculture. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture, 27*(3), 331–379. https://doi.org/10.1080/23308249.2019.1597010

Wei, Y., Zhang, X., & Li, J. (2022). Microbial bioremediation of nitrogen compounds in aquaculture systems. *Bioresource Technology, 344*, 126253. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126253