

Planificación de proyectos para el tratamiento de efluentes en la industria pesquera y acuícola colombiana

Cristina Leonela López Cuarán

Universidad de Nariño

Introducción

El tratamiento de sus efluentes es un desafío ambiental y económico para la pesca y la acuicultura, dado su elevado costo y la falta de beneficios directos; por ello, es primordial desarrollar soluciones tecnológicas eficientes y de bajo costo, que mitiguen los impactos negativos de los residuos y fomenten su aprovechamiento, promoviendo el desarrollo sostenible del sector (Carbonell et al., 2024). Este artículo es producto del Diplomado en Planificación y Gestión de Proyectos con Apoyo de Inteligencia Artificial (IA), realizado entre el 20 de septiembre y el 6 de diciembre de 2024, ofrecido por el programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad Mariana, el cual se caracterizó, entre otros aspectos, por una comprensión integral de la planificación de proyectos, análisis de partes interesadas y, la aplicación de la IA para optimizar procesos. Como resultado, se orientó la planificación estratégica hacia la implementación de sistemas de tratamiento de efluentes en la industria pesquera y acuícola de Colombia, mejorando la eficiencia operativa, reduciendo los impactos ambientales y fortaleciendo la competitividad del sector, en línea con los objetivos de sostenibilidad global.

Objetivo general

Recopilar información sobre sistemas de tratamiento de efluentes en la industria pesquera y la acuicultura, con el fin de proponer una estrategia de planificación de proyectos para la implementación de sistemas sostenibles y eficientes en Colombia.

Objetivos específicos

- Obtener información de diferentes sistemas empleados en el tratamiento de efluentes generados en la industria pesquera y en la producción acuícola.
- Desarrollar un modelo para la planificación de proyectos de tratamiento de efluentes en la industria pesquera y la acuicultura en Colombia.

Justificación

Colombia cuenta con una costa de 3.240 km, cuerpos de agua continentales que comprenden 988.000 km² de mar territorial y, 7.000 km² de ciénagas, lo que favorece una notable biodiversidad. La pesca industrial se lleva a cabo en los océanos Atlántico y Pacífico, mientras que la pesca artesanal se desarrolla tanto en los océanos como en aguas continentales. Por su parte, desde la década de 1980, la acuicultura ha mostrado un importante crecimiento, alcanzando en 2022 una producción pesquera de 320.000 toneladas, de las cuales el 60 % provino de esta actividad (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO, 2025); sin embargo, la contaminación por efluentes

pesqueros y acuícolas representa un desafío crítico en Colombia. Las empresas de estos sectores deben cumplir con las normativas ambientales y adoptar prácticas sostenibles para mitigar este problema; los efluentes contienen altos niveles de materia orgánica (60-80 % en DBO₅), nitrógeno (10-20 % en NTK), fósforo (5-10 % en Ptot) y coliformes fecales (0-50 %); en términos de impacto, los cuerpos de agua afectados incluyen ríos (40-50 %), lagos (20-40 %) y aguas costeras (10-30 %) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Minambiente, 2021).

Sistemas de tratamiento de efluentes industriales pesqueros

El procesamiento de organismos marinos genera grandes volúmenes de efluentes con altos niveles de proteínas solubles que pueden constituir hasta el 70 % de los sólidos totales; estas proteínas pueden ser recuperadas mediante diversas tecnologías como el método pH-shift, floculantes, tecnología de membranas (ultrafiltración y nanofiltración) y la hidrólisis enzimática (Salazar et al., 2022). Por ejemplo, la nanofiltración recupera hasta un 70 % de las proteínas en el lavado de sardinas con soluciones salinas, lo que posibilita su reincorporación en la producción de alimentos, mientras que, en la producción de surimi, el uso de membranas cerámicas y poliméricas (PAN M) permite recuperar hasta el 80 % de las proteínas (Santiaguín et al., 2022).

En cuanto a tratamientos biológicos, los sistemas aerobios y anaerobios se destacan por su eficacia, con ventajas destacadas en el tratamiento anaeróbico, como: menores costos operativos, producción de biogás y baja generación de lodos. Los biorreactores aeróbicos logran una remoción de 85-98 % de DQO con cargas de 0.018 a 0.037 kg DQO/m² d; en tratamiento con lodos activos con cargas de 0.5 kg DBO₅/m³ d, la remoción es de 90-95 % de DBO₅, mientras que los reactores anaeróbicos (UASB) pueden manejar cargas orgánicas de hasta 8 kg DQO/m³ d, con casi un 100 % de remoción de DQO en tiempos de retención de 7.2 horas (López-Anchundia et al., 2019). Por su parte, las lagunas de oxidación alcanzan eficiencias de remoción de DBO₅ de hasta el 95 % en lagunas aerobias, mientras estas están diseñadas para tratar aguas con alto contenido orgánico y sólidos, logrando una eliminación de DBO₅ de hasta un 85 % y una eficiencia de remoción para sólidos solubles totales reportada de 97,28 %, con beneficios como: simplicidad, bajos costos operativos y mejoras en la calidad del agua (Pis-Ramírez et al., 2021).

Adicionalmente, el uso de digestores anaerobios para producir biogás y el tratamiento secundario con microalgas, son alternativas que no solo generan energía renovable y biomasa, sino que proporcionan un efluente depurado y reducen el impacto ambiental en los sistemas acuáticos naturales. En la producción de biogás —según las características de las aguas muestreadas—, se estima obtener 21.8 m³/día de biogás, con una remoción del 60 % de DQO, mientras la fracción sólida del digestato se puede utilizar como bio-abono; por otro lado, el efluente del biodigestor puede servir como nutriente para el cultivo de microalgas, al proporcionar CO₂ para su crecimiento y, dada la capacidad de asimilación de nitrógeno y fósforo, se emplearía también como herramienta de biorremediación. Estas algas pueden ser utilizadas en acuicultura o, para la obtención de bioderivados de alto valor, con una biomasa seca estimada en 17.4 kg/mes (Carbonell et al., 2024).

Asimismo, los procesos electroquímicos y la electrocoagulación (EC) tienen mejor capacidad de remoción que los productos químicos utilizados en la coagulación; además, permiten usar equipos más pequeños, lo que reduce los costos operativos, favorece la automatización y, genera menos lodos. Aprovechando la alta conductividad y la presencia de cloruros de aguas residuales del procesamiento de caballa (*Scomber scombrus*), la EC con ánodos de aluminio logra una remoción de DQO de alrededor del 60 % a pH 7.5; el agua tratada luego, al ser sometida a electrooxidación (EO) con ánodo de grafito y cátodo de titanio, logra una DQO final inferior al límite de vertido (<700 mg/L de O₂) (Álvarez et al., 2022). Finalmente, los humedales artificiales se destacan por su economía y sostenibilidad, funcionando mediante la interacción de microorganismos y macrófitas como *Cynodon zizanioides* y *Saccharomyces cerevisiae*, alcanzando una remoción de DBO de 99,78 % y una remoción de nitrógeno total (NTK) del 71,27 % (Cedeño et al., 2020).

Sistemas de tratamiento de efluentes acuícolas

La fitorremediación con microalgas es una estrategia de economía circular que permite recuperar la calidad del efluente y generar biomasa rica en nutrientes; por ejemplo, el efluente de la acuicultura del erizo de mar (*Arbacia dufresnii*) puede usarse como medio de cultivo para microalgas como *Navicula* sp., *Tetraselmis suecica*, *Nanochloropsis galvana* y *Cylindrotheca closterium*, donde el género *Nanochloropsis* ha logrado remover



nitratos (NO_3) de 2.27 mg/L a 0.753 mg/L (hasta un 100 % de remoción), dado que el nitrógeno es esencial para su crecimiento; y, fosfatos (PO_4) de 3.56 mg/L a 0.905 mg/L. Para la remoción de PO_4 , *C. closterium* y *Navicula* sp. muestran eficiencias de 62,09 % y 73,45 % de remoción, respectivamente, debido a la relación N:P en el medio, requerida para el crecimiento microalgal, destacando su uso como alimento para larvas, lo que reduce costos y aporta valor al proceso productivo (Cassone y Martelli, 2024).

Por su parte, en la biofiltración con macroalgas, especies como *Ulva lactuca*, *Mazzaella canaliculata* y *Agarophyton chilense* tienen una eficiencia de remoción de PO_4 y nitritos (NO_2) de hasta un 87,5 %, en la remoción de amoníaco (NH_3) y, muestran una eficiencia de hasta un 46,4 % debido a la baja concentración en el efluente utilizado (0.28 mg/L); no obstante, no deja de ser un resultado positivo desde el punto del beneficio ambiental. *M. canaliculata* tiene una alta eficiencia en la remoción de NO_3 (50 %), por lo que puede usarse como biofiltro en la piscicultura, como en el caso del pez dorado (*Seriola lalandi*); además, su biomasa puede ser utilizada para generar subproductos industriales con beneficios económicos (Ramos y Gallardo, 2021).

En cuanto a los sistemas de Acuicultura Multitrófica Integrada (IMTA) en el cultivo de camarón blanco, tilapia y *Sarcocornia* en Tecnología Biofloc (BFT), la producción de NO_3 es menor en el sistema IMTA (9.38 mg/L) que con la ausencia de *Sarcocornia* (12.28 mg/L), además de que reduce la producción de lodo y sólidos suspendidos totales (SST) gracias a su capacidad de fitorremediación, mejorando el rendimiento total del sistema. En estudios sobre tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) y camarón blanco del Pacífico (*Litopenaeus vannamei*) en BFT, se mantienen niveles adecuados de sólidos suspendidos, presentando una ganancia ecológica debido al consumo de los sólidos por los peces. Con sistemas IMTA se registra la recuperación de nitrógeno del 27,9 %, mayor en tratamientos con mayor densidad de peces; además, se encuentra que las concentraciones más bajas de NH_3 y NO_2 y las más altas de NO_3 se dan a una salinidad de 18 ppt (Naspirán et al., 2022).

Finalmente, la combinación de sedimentación, filtración por *Crassostrea gigas* (ostras) y absorción por *Gracilaria chilensis* (macroalga), ha mostrado ser eficiente y económica; en la sedimentación se reporta remociones de turbidez de 73,1 %, SST de 13,17 %, sólidos volátiles totales (SVT) de 46,06 % y PO_4 de 82,23 %. En la filtración, aunque las ostras excretan NH_3 , PO_4 y otros compuestos, la remoción de fósforo es de 88,32 %; la de bacterias totales, del 50,21 % —posiblemente, por su baja concentración—; turbidez del 92,57 %, y de SST y SVT del 29,94 % y 75,4 %, respectivamente. La absorción por *G. chilensis* muestra una remoción de NH_3 del 47,1 %, turbidez de 95,24 %, SST y SVT del 34,13 % y 75,47 % respectivamente; amonio, del 39,36 %, PO_4 de 87,31 % y bacterias del 24,26 %, lo cual puede deberse a la baja concentración de bacterias totales (UFC) presentes en el efluente de *Seriola lalandi*, mientras otros estudios reportan elevadas remociones de NO_2 (76,92 %) y NO_3 (68,09 %) (Ramos y Navarro, 2019).

Igualmente, el uso de polímeros como el quitosano, ofrece ventajas sobre los coagulantes inorgánicos dada su biodegradabilidad y baja toxicidad. En efluentes de cultivo BFT, la eliminación de sólidos en suspensión con dosis de 9 mg/L de quitosano es de hasta 82,5 %; los SSV muestran una remoción de hasta un 83,1 %; la turbidez inicial fue de 30.4 NTU, y con 9 mg/L de quitosano se logró alcanzar valores de 3.9 NTU (remoción del 87 %); en cuanto al Nitrógeno Amoniacal Total (TAN), se redujo en un 20 % y las proteínas en un 45 % (Rodríguez y Gallego, 2019).

Tabla 1

Modelo para la planificación de proyectos en el tratamiento de efluentes de la industria pesquera y la acuicultura a partir de la herramienta Estructura de Desglose de Trabajo (EDT)

Fase	Subfase	Tareas principales	Duración	Precedencia
Gestión del Proyecto	Planificación del Proyecto	Definir objetivos y alcance del proyecto, identificar interesados clave, elaborar el cronograma, establecer el presupuesto y asignar recursos	Una semana	Ninguna (Actividad inicial)
	Monitoreo y control	Monitorear el progreso en cada fase, identificar y resolver desviaciones y, realizar reuniones de revisión con el equipo	Dos semanas	Comienza después de la planificación del proyecto
	Cierre del proyecto	Evaluar el proyecto y su impacto, documentar lecciones aprendidas y, cerrar administrativa y financieramente	Una semana	Comienza después del monitoreo y control
Análisis de los efluentes	Estudio de las características de los efluentes	Identificar contaminantes en efluentes, analizar física, química y microbiológicamente los efluentes y, estudiar la cantidad generada en la industria pesquera y acuícola	Un mes	Comienza después de la planificación del proyecto (Paralelo con el monitoreo y control)
	Evaluación del impacto ambiental	Identificar zonas y recursos afectados por efluentes, analizar el impacto en el ecosistema y fuentes de agua y, elaborar un informe del impacto ambiental	Un mes	Comienza después del estudio de las características de los efluentes
Diseño del sistema de tratamiento de efluentes	Selección de las tecnologías del tratamiento	Evaluar tecnologías de tratamiento (biológicas, físicas, químicas), analizar su viabilidad técnica y económica y, seleccionar las adecuadas para la industria pesquera y acuícola	Un mes	Comienza después de la evaluación del impacto ambiental
	Diseño del proceso de tratamiento	Dimensionar equipos y unidades de tratamiento, diseñar infraestructura (tanques, filtros, bombas) y definir flujos operativos y de tratamiento	Un mes y medio	Comienza después de la selección de las tecnologías del tratamiento
	Simulación y modelado del sistema	Usar software para simular el rendimiento, validar el diseño y optimizar parámetros.	0.5 meses	Comienza después del diseño del proceso de tratamiento
Implementación del sistema de tratamiento	Adquisición de equipos y materiales	Identificar proveedores, negociar y comprar equipos y materiales y, transportar e instalar equipos en el sitio	Un mes	Comienza después de la simulación y el modelado del sistema
	Construcción de la infraestructura	Excavar y construir instalaciones para el sistema de tratamiento, instalar tuberías, válvulas y conexiones, e integrar el sistema con las instalaciones existentes	Dos meses	Comienza después de la adquisición de los equipos y materiales
	Capacitación y entrenamiento	Capacitar al personal en operación y mantenimiento del sistema y en procedimientos de seguridad y protocolos operativos	Un mes	Comienza después de la construcción de la infraestructura



Fase	Subfase	Tareas principales	Duración	Precedencia
Monitoreo y control del sistema	Monitoreo de la calidad del agua tratada	Establecer puntos de monitoreo de la calidad del agua, realizar análisis periódicos del efluente tratado y, ajustar parámetros operativos según los resultados	Dos meses	Comienza después de la capacitación y el entrenamiento
	Mantenimiento preventivo y correctivo	Implementar un plan de mantenimiento preventivo, resolver fallos operativos y, reparar equipos defectuosos	Un mes	Comienza después del monitoreo de la calidad del agua tratada
Evaluación de resultados y mejora continua	Evaluación de la eficiencia del sistema	Comparar resultados con los objetivos del proyecto y estudiar la eficiencia y efectividad del tratamiento de efluentes	Dos semanas	Comienza después del mantenimiento preventivo y correctivo
	Ajustes y mejoras al sistema de tratamiento	Identificar áreas de mejora e implementar ajustes en el proceso de tratamiento y operación	Dos semanas	Comienza después de la evaluación de la eficiencia del sistema
Total del proyecto			Doce meses	

Nota. Los datos son obtenidos mediante inteligencia artificial para la presente investigación.

Conclusiones

La implementación de tecnologías innovadoras y sostenibles para el tratamiento de efluentes en la industria pesquera y acuícola en Colombia representa una oportunidad para reducir el impacto ambiental, mejorar la calidad del agua y generar productos de valor agregado; sin embargo, su adopción enfrenta desafíos como: los altos costos iniciales, la falta de infraestructura y la necesidad de adaptación a las condiciones locales. Para superar estas barreras, es fundamental un enfoque integral que combine investigación, políticas públicas, capacitación técnica y colaboración entre los sectores público, privado y las comunidades; esto permitirá desarrollar soluciones accesibles y sostenibles que impulsen la competitividad del sector, la seguridad alimentaria y el desarrollo económico.

La planificación y la gestión de los proyectos en el tratamiento de dichos efluentes son esenciales para garantizar el cumplimiento de los objetivos de calidad ambiental, eficiencia operativa y optimización de recursos. Es crucial que los proyectos cuenten con una planificación flexible que permita adaptarse a los cambios durante la ejecución, y que se invierta en la capacitación y en el seguimiento continuo del sistema para asegurar su funcionamiento eficiente y su impacto positivo en el medio ambiente. La adecuada planificación no solo facilita la ejecución exitosa del proyecto, sino que maximiza los beneficios a largo plazo, tanto para la industria como para el entorno natural.

Referencias

- Álvarez, J. M., Arrieta, M. B., Arturi, T. S. y Bianchi, G. L. (2022). Proceso combinado de electrocoagulación y electrooxidación para el tratamiento de aguas residuales de la industria pesquera. *RevICAp, Revista de Ingeniería y Ciencias Aplicadas*, 3(1), 31-37.
- Carbonell, L., Pedraza, J. y López, L. M. (2024). Potencial de las aguas residuales pesqueras para la producción de biogás y microalgas. *Centro Azúcar*, 51(1).
- Cassone, G., & Martelli, F. (2024). Electrofreezing of liquid water at ambient conditions. *Nature Communications*, 15, 1856. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46131-z>

- Cedeño, D. E., Loureiro, J. A., Delgado, M. M., Delgado, C. R. y Fajardo, P. C. (2020). Evaluación de un humedal artificial aireado en efluente de una planta de tratamiento de aguas residuales de la industria atunera, Manta, Manabí, Ecuador. *Mikarimin, Revista Científica Multidisciplinaria*, 6(Edición especial).
- López-Anchundia, E., Morales-Paredes, E. y Alvarado-Zambrano, S. (2019). Aspectos biológicos en la digestión anaerobia de las aguas residuales de la industria pesquera. *Revista de Ciencias del Mar y Acuicultura YAKU*, 2(4), 20-27.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (2021). 2020, Informe de gestión. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/INFORME_GESTION_MINAMBIENTE_2020.pdf
- Naspirán, D., Fajardo, A., Ueno, M. y Collazos, L. (2022). Perspectivas de una producción sostenible en acuicultura multitrófica integrada (IMTA): una revisión. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 69(1), 75-97. <https://doi.org/10.15446/rfmvz.v69n1.101539>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2025). Perfiles de países de pesca y acuicultura. <https://www.fao.org/fishery/es/facp/search>
- Pis-Ramírez, M. A., Ocano-Bucia, C. A. y Arencibia-Carballo, G. (2021). Caracterización de las aguas residuales de la Unidad Empresarial de Base (UEB) Cárdenas, Matanzas, Cuba. *Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras*, 38(1), 16-26.
- Ramos, R. y Navarro, A. (2019). Tratamiento de efluentes del cultivo de *Seriola lalandi* por sedimentación, filtración y absorción en diferentes tiempos de retención hidráulica. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 54(3), 297-307. <https://doi.org/10.22370/rbmo.2019.54.3.2020>
- Ramos, R. y Gallardo, S. (2021). Capacidad de biofiltración de nutrientes y crecimiento de macroalgas utilizando efluentes generados en el cultivo del pez dorado *Seriola lalandi* (Perciformes: Carangidae). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 56(1), 13-21. <https://doi.org/10.22370/rbmo.2021.56.1.2795>
- Rodríguez, D. y Gallego, D. (2019). Evaluación del quitosano como coagulante para el tratamiento de efluentes piscícolas. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 21(1), 6–17. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v21n1.73340>
- Salazar, J. A., Navarro, R. S., Martínez, E. y Osuna. I. (2022). Seafood. En *Bioactive Peptides from Food*. CRC Press.
- Santiago, A., Cadena, A., Arias, J., Meza, A., Torres, J., Reynaga, F., Cuevas, D. y Garzón, A. (2022). Aguas residuales de la industria pesquera: Retos y oportunidades en la recuperación de proteínas y péptidos con alto valor biológico y funcional - Una revisión. *TIP, Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 25, 1-16. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.512>

