



ALLIANCE™

(<https://www.globalseafood.org>).



Intelligence

Reseña de Captura y Cultivo: La acuicultura de precisión puede impulsar mayores avances en la industria acuícola

11 May 2026

By Darryl Jory, Ph.D.

La acuicultura de precisión requiere poner a prueba las innovaciones interdisciplinarias como sistemas operativos integrales que generen, de manera consistente, beneficios escalables para las granjas acuícolas



Estudio analiza cómo la acuicultura de precisión avanzará de forma más eficaz cuando las innovaciones y tecnologías interdisciplinarias se prueben como sistemas operativos completos – de principio a fin – y se demuestre que generan beneficios consistentes y escalables en condiciones reales de granja. Fotografía de Darryl Jory.

A lo largo de las últimas décadas, la acuicultura ha evolucionado a través de distintas etapas tecnológicas, a menudo descritas como Acuicultura 1.0 a 4.0. La Acuicultura 1.0 se basaba en prácticas tradicionales de gran intensidad de mano de obra, con alimentación manual, recambio de agua y observación visual.

A medida que crecía la demanda mundial de productos del mar, la Acuicultura 2.0 trajo consigo la industrialización y la intensificación mediante la mecanización y el uso de alimentos o piensos formulados. La Acuicultura 3.0 se centró en la intensificación sostenible, respaldada por esquemas de certificación, regulaciones más estrictas y una mejor bioseguridad.

Hoy en día, la Acuicultura 4.0 representa una transición hacia la automatización, la precisión y la conectividad. Impulsada por tecnologías digitales – tales como sensores inteligentes, alimentadores automáticos, visión artificial, monitoreo satelital y análisis en la nube – la acuicultura de precisión pone el énfasis en la integración de datos en tiempo real y en la toma de decisiones inteligente. Esta evolución posiciona a la Acuicultura 4.0 como un pilar fundamental para la construcción de sistemas de producción de alimentos acuáticos resilientes y sostenibles.

En esta **revisión** (<https://doi.org/10.1016/j.fraope.2026.100567>) realizada por Rishikesh Ratan y sus colegas en la India, los autores exploraron cómo la IA – en combinación con el Internet de las Cosas (IoT) y el “big data” (conjuntos de datos masivos y complejos que los sistemas tradicionales de gestión de datos no logran procesar) – está transformando la acuicultura inteligente mediante la automatización inteligente, el soporte a la toma de decisiones en tiempo real y el análisis predictivo. El

estudio destaca cómo técnicas tales como el aprendizaje automático (machine learning), el aprendizaje profundo (deep learning), los mecanismos de atención y los modelos híbridos están impulsando avances significativos en áreas como el monitoreo de la calidad del agua, la detección de enfermedades, la optimización de la alimentación y el análisis del comportamiento de los peces.



(<https://info.globalseafood.org/get-certified>).

Su investigación también analizó innovaciones emergentes que trascienden las aplicaciones tradicionales de la IA, incluyendo el aprendizaje federado (una técnica de aprendizaje automático en un entorno donde múltiples entidades o clientes entrenan un modelo de forma colaborativa, manteniendo sus datos descentralizados en lugar de almacenados centralmente), la IA explicable, la computación de borde (edge computing) y el aprendizaje por transferencia; enfoques que ayudan a superar desafíos clave relacionados con la privacidad de los datos, la escalabilidad y la adaptabilidad en el entorno acuícola, en constante evolución.

Se presta especial atención a la integración fluida de la IA con los sistemas del Internet de las Cosas (IoT) y al uso de gemelos digitales (modelos digitales de un producto, proceso o sistema físico del mundo real – ya sea previsto o existente – que actúan como su contraparte digital para fines de simulación, integración, pruebas, monitoreo y mantenimiento) para simular, monitorear y optimizar las operaciones de cultivo. La revisión examina, además, el papel prometedor de la IA cuántica y la tecnología de blockchain en la construcción de sistemas acuícolas preparados para el futuro.

Finalmente, esta revisión ofrece una mirada crítica a las barreras socioeconómicas, infraestructurales, éticas y regulatorias que frenan la adopción de la IA – particularmente en regiones rurales y con recursos limitados – y propone un marco con visión de futuro para la creación de sistemas acuícolas inteligentes, escalables, resilientes y sostenibles, impulsados por la IA de próxima generación.

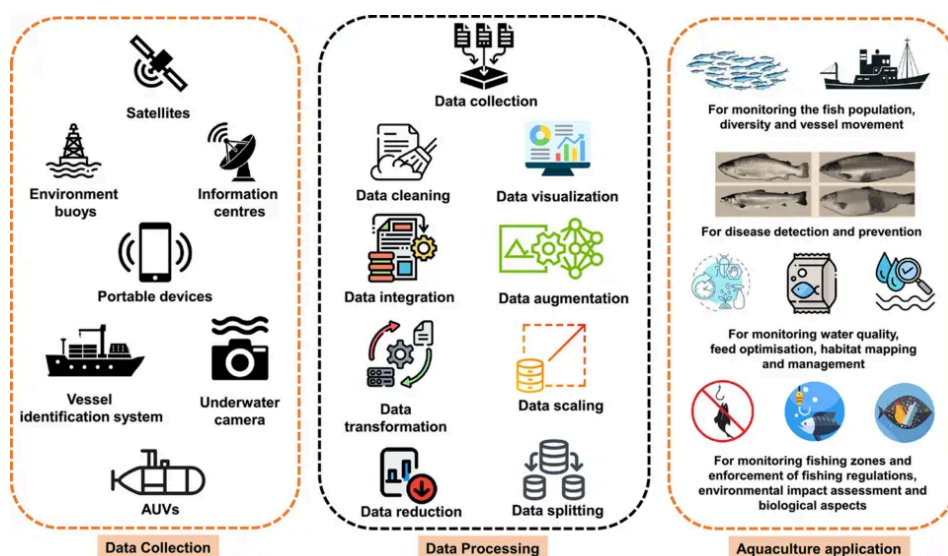


Fig. 1: Recopilación, procesamiento y aplicación de datos mediante IA

en la acuicultura.

Relevancia de los hallazgos de la investigación para la industria

La industria acuícola mundial se enfrenta a la presión de producir más productos del mar con menos recursos, al tiempo que debe cumplir con estrictos estándares de sostenibilidad y bienestar animal. Los costos de alimentación suelen representar entre el 50 y el 70 por ciento de los gastos operativos; las herramientas de optimización impulsadas por IA, destacadas en este estudio, han demostrado generar ahorros de entre el 20 y el 30 por ciento en ensayos de campo, mejorando directamente la rentabilidad. La detección temprana de enfermedades y la gestión predictiva de la calidad del agua pueden reducir la mortalidad en porcentajes de dos dígitos. Esta constituye una ventaja crítica en una industria donde los brotes pueden aniquilar poblaciones enteras de cultivo de la noche a la mañana.

El énfasis en los gemelos digitales y la IA de borde (edge AI) resulta particularmente oportuno para los productores a gran escala que están migrando hacia los sistemas de acuicultura de recirculación (RAS) o hacia las granjas en mar abierto (offshore), entornos donde el monitoreo remoto y la respuesta rápida resultan esenciales. Los operadores de menor escala en las regiones en desarrollo valorarán el análisis sobre el aprendizaje federado y el aprendizaje por transferencia, técnicas que reducen la necesidad de contar con conjuntos de datos locales masivos y, por ende, disminuyen las barreras de entrada.

Al abordar obstáculos del mundo real – tales como la deriva de los sensores, los problemas de conectividad y los elevados costos iniciales – esta investigación ofrece conocimientos prácticos que pueden ayudar a los proveedores de tecnología a diseñar soluciones más robustas y asequibles, así como a orientar a los responsables políticos en la creación de marcos regulatorios de apoyo. En términos generales, los hallazgos parecen alinearse estrechamente con los objetivos del sector en materia de precisión, rastreabilidad y resiliencia: pilares fundamentales para satisfacer la creciente demanda de productos del mar certificados y ambientalmente responsables, al tiempo que se gestionan la variabilidad climática y las interrupciones en la cadena de suministro.

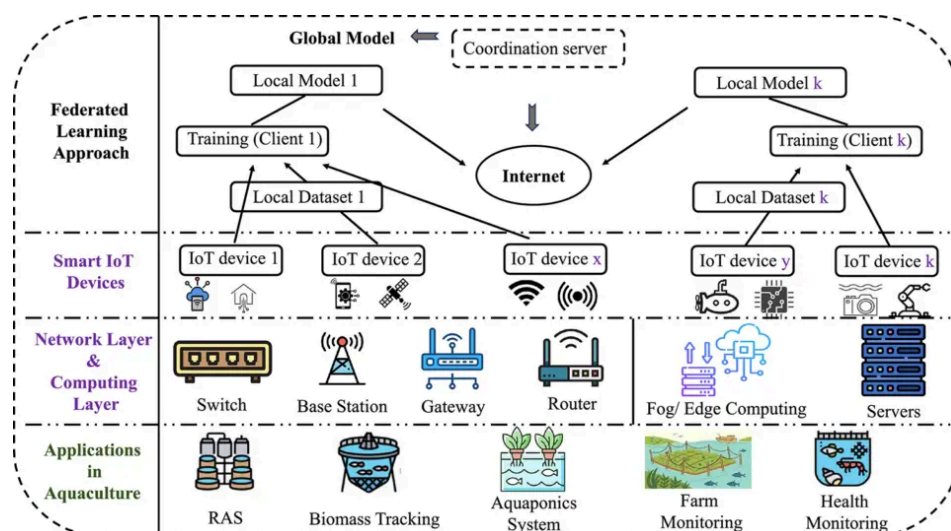


Fig. 2: Flujo del proceso de aprendizaje federado y su aplicación en la acuicultura. Adaptado del original.

Perspectivas

La acuicultura está experimentando una transformación significativa a medida que la inteligencia artificial, los sensores conectados y las herramientas digitales de apoyo a la toma de decisiones aportan una mayor precisión y posibilitan una gestión verdaderamente basada en datos. Estudios recientes demuestran que los sistemas impulsados por IA pueden mejorar sustancialmente el monitoreo de la calidad del agua en tiempo real, predecir eventos críticos, permitir la detección temprana de enfermedades y optimizar la alimentación y la aireación, generando así claros beneficios en términos de productividad, bienestar de los peces y sostenibilidad ambiental.

Este estudio también destaca que el valor real de estas tecnologías trasciende con creces la mera complejidad de los modelos. El éxito depende de la fiabilidad con la que se desempeñen bajo las condiciones reales de las granjas, lo que incluye desafíos como la turbidez del agua, la iluminación variable, la oclusión visual de los peces en altas densidades, la deriva de los sensores, la bioincrustación, la conectividad inestable y las diferencias entre los distintos emplazamientos. El progreso futuro exigirá un mayor énfasis en la presentación estandarizada de informes de rendimiento y en una validación rigurosa entre diferentes sitios, informando de manera transparente sobre los errores de predicción, la precisión de la clasificación, la latencia del sistema, el tiempo de actividad, el consumo energético y los requisitos de mantenimiento; todo ello con el fin de que los resultados puedan compararse y replicarse de forma significativa en distintos despliegues operativos.

Técnicas como el aprendizaje por transferencia, el aprendizaje federado y la IA explicable seguirán desempeñando un papel vital para superar la escasez de datos, los problemas de privacidad y las barreras para la adopción, especialmente al aplicar modelos en diferentes granjas o regiones. Al mismo tiempo, la integración de estos sistemas con gemelos digitales y plataformas de datos seguras puede reforzar la rastreabilidad y la rendición de cuentas, siempre y cuando las directrices éticas y los marcos de gobernanza avancen al mismo ritmo que la tecnología.

Por consiguiente, la investigación futura debería priorizar la realización de comparativas sólidas entre granjas mediante el uso de indicadores clave de rendimiento estandarizados (KPI, un tipo de métrica de desempeño utilizada para evaluar el éxito de una organización, actividad, proyecto o proceso en la consecución de objetivos definidos); protocolos de calibración y mantenimiento que tengan en cuenta la deriva de los sensores; modelos implementables en el borde de la red (edge computing) con métricas claras de latencia y consumo energético; y marcos seguros de gemelos digitales para la gobernanza de datos. En última instancia, la acuicultura de precisión avanzará de manera más eficaz cuando las innovaciones interdisciplinarias se evalúen y validen como sistemas operativos integrales – de extremo a extremo – capaces de generar beneficios consistentes y escalables en entornos de producción reales.

[“Todo empieza con el whisky: empresa de Escocia aumentando la producción de biomasa de microalgas para alimentos de acuicultura y para mascotas](https://www.globalseafood.org/advocate/todo-empieza-con-el-whisky-empresa-de-escocia-aumentando-la-produccion-de-biomasa-de-microalgas-para-alimentos-de-acuicultura-y-para-mascotas/)
(<https://www.globalseafood.org/advocate/todo-empieza-con-el-whisky-empresa-de-escocia-aumentando-la-produccion-de-biomasa-de-microalgas-para-alimentos-de-acuicultura-y-para-mascotas/>)”

La fermentación desempeña un papel importante en la producción moderna de alimentos acuícolas

Mediante la predigestión microbiana y la actividad probiótica, el alimento fermentado mejora la eficiencia alimenticia, fortalece la función inmunitaria, promueve la salud intestinal y realza la calidad del producto en los animales acuáticos de cultivo. Fotografía de Fernando Huerta.

El alimento fermentado está emergiendo como un alimento funcional prometedor que utiliza la fermentación microbiana para potenciar tanto el valor nutricional como la palatabilidad de los piensos acuícolas. Ayuda a abordar problemas comunes en la acuicultura, tales como la digestión deficiente, la inmunidad debilitada y la fuerte dependencia de la harina de pescado.

Un **estudio** (<https://doi.org/10.3390/microorganisms14020416>) realizado por Caihuan Ke y sus colaboradores en China aborda los fundamentos del alimento fermentado, sus beneficios clave, los principales tipos que se utilizan actualmente y los factores que influyen en su eficacia. Asimismo, destaca los impactos positivos observados en las especies acuícolas, entre los que se incluyen un crecimiento más rápido, respuestas inmunitarias más robustas, una microbiota intestinal más saludable y una mejor calidad general del producto. Su objetivo es ofrecer una base teórica sólida que respalde tanto las prácticas de producción como una adopción más amplia en el sector.

El alimento fermentado se elabora sometiendo los ingredientes convencionales para piensos acuícolas a un proceso de fermentación microbiana, lo cual mejora significativamente su calidad y utilidad. Este proceso realza la palatabilidad y la calidad general del alimento, lo que se traduce en una mayor ingesta y una mejor eficiencia alimenticia en las especies acuícolas. El proceso de fermentación descompone las proteínas y los carbohidratos de gran tamaño en moléculas más pequeñas y de más fácil digestión, tales como las proteínas solubles en ácido y los azúcares reductores. Esto no solo facilita la absorción de nutrientes y favorece la salud intestinal, sino que también fortalece la inmunidad y la resistencia a las enfermedades.

Además, la fermentación mejora las propiedades físicas del alimento y contribuye a la descomposición de los factores antinutricionales. Como resultado, los alimentos fermentados – y, en particular, las fuentes proteicas fermentadas – se perfilan como una opción sumamente prometedor para sustituir,

ya sea parcial o totalmente, a la harina de pescado. Dadas estas ventajas, la investigación sobre los alimentos fermentados se ha convertido en un eje central de la ciencia de la alimentación animal, ofreciendo soluciones prácticas a algunos de los desafíos más importantes que enfrenta la industria acuícola.

Los autores han analizado las principales características del alimento fermentado, los factores que influyen en el proceso de fermentación, su rendimiento en aplicaciones prácticas, sus limitaciones actuales y las tendencias de investigación emergentes. Si bien el alimento fermentado demuestra un gran potencial para reducir costos y optimizar la eficiencia productiva, aún debe superar ciertos obstáculos; concretamente, las limitaciones en su producción a gran escala y la escasez de investigaciones centradas específicamente en los crustáceos.

De cara al futuro, resulta indispensable intensificar los esfuerzos en la creación de bases de datos exhaustivas, el desarrollo de métodos de fabricación inteligentes y la realización de evaluaciones económicas rigurosas, con el fin de fomentar una adopción más amplia de esta tecnología en el sector acuícola.

Fig. 3: Beneficios del alimento fermentado para los animales acuícolas. Adaptado del original.

Relevancia de los hallazgos de la investigación para la industria

Los precios de la harina de pescado y la volatilidad de su suministro siguen siendo puntos críticos para el sector acuícola. Las alternativas fermentadas – especialmente aquellas derivadas de proteínas vegetales o subproductos agroindustriales – ofrecen una vía práctica para sustituir entre el 40 y el 100 por ciento de la harina de pescado en ciertas formulaciones, sin comprometer (y, en ocasiones, mejorando) el rendimiento. Una mayor eficiencia alimenticia se traduce directamente en menores costos de producción, mientras que una mejor inmunidad y salud intestinal pueden reducir los brotes de enfermedades y el uso de antibióticos en sistemas de alta densidad.

El análisis detallado de los parámetros de fermentación proporciona a los fabricantes de alimentos información práctica y aplicable para optimizar sus procesos; por ejemplo, mediante la selección de consorcios microbianos sinérgicos o el control de la humedad y la temperatura para garantizar una calidad constante. Para los acuicultores, una mayor palatabilidad y digestibilidad se traducen en una mayor ingesta de alimento y un crecimiento más acelerado, aspectos de especial valor en especies como el camarón o la tilapia, que dominan la producción mundial. Asimismo, el énfasis en la mejora de la calidad del producto (p. ej., mejor sabor y menor oxidación) podría contribuir a satisfacer la demanda de los consumidores de productos acuáticos de alta gama y producidos de manera responsable.

No obstante, las brechas identificadas – la escasez de datos específicos sobre crustáceos y los desafíos inherentes a la ampliación de escala – resultan particularmente relevantes para los criadores de camarones y cangrejos, quienes representan una cuota de mercado considerable. Los alimentos fermentados podrían, potencialmente, respaldar y acelerar la transición hacia dietas más circulares y con menor contenido de harina de pescado, así como apoyar los programas de certificación centrados en la sostenibilidad.

Perspectivas

Esta revisión demuestra que la tecnología de fermentación no es un mero complemento de moda, sino una herramienta genuinamente útil para dotar a los alimentos acuícolas de una mayor eficiencia y hacerlos más saludables para los animales. El análisis aborda beneficios realistas y comprobados en términos de crecimiento, inmunidad y salud intestinal, al tiempo que señala abiertamente las inconsistencias, los riesgos para la seguridad y la falta de implementación a gran escala.

Los piensos fermentados han mostrado un potencial real en la acuicultura, al mejorar la eficiencia con la que los animales aprovechan el alimento, reforzar sus sistemas inmunológicos y favorecer su salud intestinal; todo ello, contribuyendo simultáneamente a la reducción de costos. Sin embargo, aún deben superar ciertos obstáculos prácticos, concretamente: mantener bajo control a las bacterias nocivas, capacitar y especializar al personal técnico, y profundizar en la comprensión del funcionamiento real de la fermentación a nivel mecanicista. Los esfuerzos futuros deberían centrarse en enfoques de fermentación multicepa, en la adopción de tecnologías de producción más inteligentes y en la ampliación de la investigación sobre crustáceos, tales como camarones y cangrejos.

“Camarón sin ablación de Seajoy responde a preocupación emergente de bienestar (<https://www.globalseafood.org/advocate/camaron-sin-ablacion-de-seajoy-responde-a-preocupacion-emergente-de-bienestar/>)”

Evaluación del éxito de desove y la producción de postlarvas de camarones peneidos sin ablación de los pedúnculos oculares

Los hallazgos de este estudio indican que la ablación de los pedúnculos oculares sigue siendo una práctica necesaria para inducir la maduración y el desove en *P. monodon* domesticado, al menos hasta que se desarrolle una alternativa viable y no invasiva. Sin embargo, para *P. vannamei* se debería fomentar el desove sin ablación, ya que beneficia tanto al bienestar de los camarones como a la calidad general de las postlarvas (PL). En última instancia, una comprensión más profunda de cómo desovan naturalmente los camarones peneidos en su entorno silvestre es esencial para desarrollar estrategias de maduración menos intervencionistas y más eficaces para los criaderos comerciales. Fotos de PL de *P. vannamei* (izquierda) por Francisco Miranda y de PL de *P. monodon* (derecha) por Darryl Jory.

El desarrollo sostenible de la industria camaronera mundial depende no solo de un suministro constante de reproductores domesticados, sino también de su capacidad para desovar de manera fiable y rentable bajo condiciones comerciales.

En una **investigación** (<https://doi.org/10.1016/j.aaf.2025.09.006>), realizada por Tung Hoang y Binh Thai Nguyen en Vietnam, los autores analizaron 13 conjuntos de datos de maduración recopilados en tres criaderos comerciales de camarones en Vietnam, y compararon el rendimiento reproductivo del camarón blanco del Pacífico (*Penaeus vannamei*) y del camarón tigre negro (*P. monodon*) domesticados, con y sin ablación de los pedúnculos oculares.

Durante la última década, el rendimiento reproductivo de *P. vannamei* sin ablación ha mejorado notablemente. Los resultados de 2024 mostraron que las hembras de *P. vannamei* sin ablación superaron significativamente a las hembras sometidas a ablación. Produjeron un promedio de 8,3 millones de nauplios por hembra a lo largo de 21 a 27 desoves durante un período de 126 a 148 días, una cifra casi cuatro veces superior a la de las hembras con ablación. La tasa de desove nocturno para *P. vannamei* sin ablación fue sólida, promediando un 21,6 por ciento. Los camarones también mantuvieron un buen estado de salud, con una tasa de crecimiento positiva de 0,29 gramos por día.

Y, en comparación con los datos de 2015 provenientes del mismo proveedor de reproductores, la tasa de desove nocturno aumentó del 14,6 al 21,6 por ciento; la fecundidad se incrementó en un 37 por ciento (de 250 a 352 × 10³ nauplios por desove); y el rendimiento total de nauplios por hembra experimentó un salto del 113 por ciento (de 3,9 a 8,3 millones).

Por el contrario, las hembras domesticadas de *P. monodon* que fueron sometidas a ablación del pedúnculo ocular e inseminación artificial produjeron un promedio de 3,3 millones de nauplios por hembra a lo largo de un periodo de 91 a 102 días, con una fecundidad que osciló entre 447 y 507×10^3 nauplios por desove. La supervivencia de los ejemplares de *P. monodon* sometidos a ablación promedió el 58,8 por ciento. Tanto los machos como las hembras ablacionadas continuaron creciendo durante dicho periodo. Sin embargo, las hembras de *P. monodon* no ablacionadas tuvieron un desempeño muy deficiente, produciendo tan solo 0,05 millones de nauplios por hembra, una cifra 72 veces inferior a la de sus contrapartes ablacionadas. Sus bajas tasas de maduración y desove sugieren que la prohibición de la ablación del pedúnculo ocular haría que la producción comercial de poslarvas de *P. monodon* domesticado resultara económicamente inviable y técnicamente impracticable, debido al aumento masivo en el número de reproductores y en los recursos requeridos.

Fig. 4: Desempeño de desove de *P. vannamei* ablacionadas y no ablacionadas en laboratorios comerciales de producción de larvas en 2015 y 2024. Los datos corresponden a las medias \pm S.E.M. (E.E.M., Error Estándar de la Media). Para cada parámetro de evaluación, las medias que presentan caracteres diferentes son estadísticamente distintas a un nivel de $\alpha = 0,05$. Adaptado del original.

En términos generales, estos hallazgos indican que el desove de *P. vannamei* domesticado sin recurrir a la ablación del pedúnculo ocular no solo es factible, sino que debería promoverse activamente; mientras que una prohibición de la ablación plantearía serios desafíos para las operaciones de los laboratorios de producción de larvas de *P. monodon*.

Fig. 5: Patrones de desove de hembras domesticadas de *P. vannamei* ablacionadas y no ablacionadas en laboratorios comerciales de producción de larvas en 2015 y 2024. Los datos corresponden a los valores promedio de “n” lotes de reproductores, tal como se indica en la leyenda. Adaptado del original.

Relevancia de los hallazgos de la investigación para la industria

Vietnam es uno de los principales productores de camarón del mundo, y sus criaderos suministran anualmente miles de millones de poslarvas tanto a los mercados nacionales como a los de exportación. Los datos comerciales del mundo real utilizados en este estudio – en lugar de ensayos a escala de laboratorio – hacen que sus hallazgos sean especialmente valiosos para los gerentes de criaderos, los proveedores de reproductores y los responsables políticos que debaten la imposición de restricciones basadas en el bienestar animal sobre la ablación de los pedúnculos oculares.

En el caso de *P. vannamei*, especie que domina la producción mundial, los resultados son sumamente alentadores. Estos demuestran que las líneas modernas domesticadas pueden ofrecer rendimientos superiores de nauplios sin necesidad de intervención quirúrgica, lo cual respalda la adopción de estándares de bienestar más elevados, reduce el estrés en los reproductores y, potencialmente, disminuye los costos laborales en los criaderos. La mejora documentada a lo largo de una década sugiere, asimismo, que la continua selección genética y una mejor gestión están reduciendo progresivamente la brecha de rendimiento.

En cuanto a *P. monodon* – especie que sigue siendo importante en muchos mercados “premium” y nacionales, y cuya producción en cultivo está actualmente en aumento en diversos países – los datos indican que, sin la ablación, la producción disminuiría hasta alcanzar niveles que harían insostenible la producción a gran escala. Cualquier prohibición regulatoria que se implemente sin contemplar exenciones específicas para cada especie o sin lograr avances significativos en la domesticación de *P. monodon* podría perturbar el suministro de semillas, elevar los costos y poner en riesgo la producción a nivel de granja, especialmente en aquellas regiones que aún dependen del camarón tigre negro.

El estudio también subraya la importancia de contar con conjuntos de datos comerciales fiables. Muchos trabajos de investigación anteriores se basaban en grupos experimentales reducidos o en ensayos de corta duración; los hallazgos presentados aquí, en cambio, reflejan las operaciones reales

de los criaderos a lo largo de varios meses, lo que otorga a la industria una mayor confianza a la hora de planificar un futuro potencialmente libre de ablación.

Fig. 6: Patrones de desove de *P. monodon* domesticado en criaderos comerciales. A#: número de lote de reproductores, inducidos al desove mediante ablación de los pedúnculos oculares en el Criadero A.
Adaptado del original.

Perspectivas

Este estudio destaca el impresionante progreso hacia un futuro libre de ablación para *P. vannamei*, así como las aleccionadoras limitaciones que aún enfrentan los productores de *P. monodon*; asimismo, señala que la industria camaronera no está del todo preparada para una prohibición generalizada y uniforme de la ablación del pedúnculo ocular. No obstante, en el caso del camarón blanco del Pacífico – la especie dominante en la acuicultura mundial – la tecnología y la genética han avanzado lo suficiente como para que la industria pueda avanzar de manera responsable.

Además, el estudio abre vías claras para futuras investigaciones: la continuidad en la selección genética de ejemplares de *P. monodon* de alto rendimiento no sometidos a ablación, el perfeccionamiento de técnicas de maduración no invasivas y la realización de análisis de costo-beneficio de sistemas de producción a gran escala libres de ablación. Si la industria aprovecha estos resultados – invirtiendo en mejores programas de reproductores y compartiendo datos entre los laboratorios de cría – podría experimentar una transformación genuina hacia una producción de semilla de camarón más sostenible y con un mayor bienestar animal, sin sacrificar por ello los niveles de producción.

Author



DARRYL JORY, PH.D.

Editor Emeritus

darryl.jory@globalseafood.org (mailto:darryl.jory@globalseafood.org)

Copyright © 2026 Global Seafood Alliance

All rights reserved.