

revista versión[®] diferente

Salmón-Acuícola



COMPENDIO DE PATOLOGÍAS EN SALMÓNIDOS | PATRONES MOLECULARES ASOCIADOS A LA MELANOSIS EN FILETE DE SALMÓN | CASO NEFROCALCINOSIS Y SHS | VACUNACIÓN AUTOMATIZADA MEDIANTE TECNOLOGÍA NFT

| EVALUACIÓN DEL BIENESTAR EN LA PRODUCCIÓN DE SMOLT EN CHILE | ESTUDIO DE LA SANGRE EN LAS INFECCIONES POR PRV | FAGOS, PROFAGOS Y DEFENSAS BACTERIANAS EN SRS Y TENACIBACULOSIS EN SALMONICULTURA | INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN ACUICULTURA CHILENA | SOLUCIONES TECNOLÓGICAS PARA UNA ACUICULTURA DE ALTA PRECISIÓN | ALMIDÓN FUNCIONAL DE TRIGO Y REOLOGÍA PARA PIENSOS EN ACUICULTURA | PROGRAMA TECNOLÓGICO PTEC OSTRA JAPONESA | INVESTIGACIÓN UACH CON IMPACTO EN EL TERRITORIO | YESOTOXINA ¿UNA AMENAZA PARA LA INDUSTRIA MITILICULTURA CHILENA?



issuu

Distribución Gratuita Consérvela

TOPGRADE

Nutrición que transforma la calidad del filete

La melanosis es un desafío creciente para la industria. TopGrade entrega una estrategia nutricional diseñada para proteger la calidad del filete en momentos críticos: manejos, eventos sanitarios y períodos ambientales de riesgo.

Su combinación funcional reduce la acumulación de melanina, modula la inflamación y fortalece la capacidad antioxidante del pez.

El resultado: filetes más uniformes, atractivos y predecibles.





Año 23 - N°40
Edición Especial
Primer Semestre 2026

Distribución Gratuita a nivel nacional
Semestral - 3.000 unidades

Editores

Opción Comunicaciones
Cel: +56 9 9443 3504
richardaraya@opcionaraya.cl

Diseño y Diagramación

Lucía Zúñiga Fuentes
luciazunigaf@gmail.com

Fotografías Portada

Gentileza de:

- ~ Jean Paul Araya, Agencia Jams
- ~ Patricio Díaz, Universidad de los Lagos
- ~ Johnny Blanc, Alimentos San Pablo
- ~ Gabriela Besoain, Pharmaq
- ~ Sandra Bravo, UACH
- ~ Alejandra Bertran, UACH
- ~ Marcelo Vera, Vehice

Revista "Versión Diferente", es un medio de comunicación independiente creado y editado por Opción Comunicaciones. Queda prohibida la reproducción de todo el contenido sin previa autorización de sus editores, asimismo como la reproducción total o parcial de los anuncios publicitarios firmados por Opción Comunicaciones.

Los contenidos y opiniones que aparecen en esta publicación son de exclusiva responsabilidad de las empresas o personas que las emiten, y no necesariamente los editores comparten los conceptos aquí mencionados.

Una Producción de:

opción
comunicaciones

SU MEJOR OPCION EN PUBLICIDAD

Porque somos diferentes,
publique con nosotros

Cel: +56 9 9443 3504
richardaraya@opcionaraya.cl

Avisadores

VeHiCe	7
Diving Trapananda	13
Lipigas	19
Pharmaq	24
Salmonicultores de Magallanes	33
Plásticos Austral	39
Blue Metrics	48
Universidad de Chile	61
AquaBC	79
Universidad de los Lagos	86
Salmofood	T2
Veterquímica	T3
Lota Protein	T4

Contenidos

Indice de Universidades	2
Editorial	3
Fases Lunares	4
Ferias Internacionales	5
Ferriados Internacionales	6
Compendio actualizado de patologías no infecciosas en Salmónidos	8
El código de la mancha: patrones moleculares asociados a la melanosis en el filete de salmón	14
Caso Nefrocalcinosis y Síndrome Hemorrágico del Smolt	20
Vacunación automatizada mediante tecnología NFT: Desempeño técnico, eficiencia productiva y bienestar animal en la aplicación en Chile	25
La importancia del estudio de la sangre en las infecciones por Piscine orthoreovirus	34
Inteligencia Artificial en la acuicultura chilena	44
Blue Metrics: Soluciones tecnológicas para una acuicultura de alta precisión	49
Almidón funcional de trigo y reología para piensos en Acuicultura San Pablo (ASP)	62
Alimentar al salmón con la fuerza de la tierra chilena	87
Cambio generacional y gobernanza de la acuicultura: Reflexión estratégica	91

INDICE DE UNIVERSIDADES

sus Estudios e Investigaciones

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE

- 28 EVALUACIÓN DEL BIENESTAR EN LA PRODUCCIÓN DE SMOLTS EN CHILE
- 74 INVESTIGACIÓN UACH CON IMPACTO EN EL TERRITORIO

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO

- 40 ESTRUCTURA Y CINÉTICA DE EXPRESIÓN DE *sdha* DE PISCIRICKETTSIA SALMONIS DURANTE UNA INFECCIÓN DE CÉLULAS SIMILARES A MACRÓFAGOS DE SALMÓN DEL ATLÁNTICO

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

- 52 IMPLEMENTANDO UNA ESTRATEGIA DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA FASE DE ENGORDA DE LA SALMONICULTURA

UNIVERSIDAD DE CHILE

- 57 FAGOS, PROFAGOS Y DEFENSAS BACTERIANAS: NUEVAS CLAVES PARA ENFRENTAR LA SEPTICEMIA RICKETTSIAL DEL SALMÓN (SRS) Y LA TENACIBACULOSIS EN SALMONICULTURA
- 59 FAGOS Y LISINAS COMO HERRAMIENTAS DE PRECISIÓN PARA UNA ACUICULTURA SOSTENIBLE

UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE

- 70 PROGRAMA TECNOLÓGICO PTEC OSTRA JAPONESA: DESARROLLO Y ESCALAMIENTO SUSTENTABLE DE LA INDUSTRIA DE LA OSTRA JAPONESA

UNIVERSIDAD DE LOS LAGOS

- 80 YESOTOXINAS: ¿UNA AMENAZA PARA LA INDUSTRIA MITILICULTORA CHILENA?

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO

- 94 LA PESQUERÍA DE JUREL EN EL PACÍFICO SUR ORIENTAL (1973-2025): INCLUYENDO EL AMBIENTE EN LA ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO MÁXIMO SOSTENIDO

Editorial

Para la edición primer semestre 2026, traemos una variedad de temas salmón-acuícolas tales como: Compendio de Patologías en salmónidos;

Patrones Moleculares asociados a la Melanosis en filete de salmón; Caso Nefrocalcinosis y SHS; Vacunación automatización mediante tecnología NFT; Evaluación del Bienestar en la producción de Smolt en Chile; Estudio de la sangre en las infecciones por PRV; Fagos, Profagos y Defensas Bacterianas en SRS y TENACIBACULOSIS en salmonicultura; Inteligencia Artificial en Acuicultura Chilena; Soluciones tecnológicas para una acuicultura de alta precisión; Almidón funcional de trigo y reología para pienso en acuicultura; Programa Tecnológico PTEC Ostra Japonesa; Investigación UACH con impacto en el territorio; Yesotoxina, amenaza para la industria Mitilicultura Chilena.

Seguimos buscando temas de investigación relacionados con Salmonicultura, Acuicultura, Pesquería, Algal y Mitilicultura a nivel nacional de interés de nuestros lectores.

Esperamos para la edición digital e impresa primer semestre 2026, sea un aporte en materia de consulta de nuestros lectores habituales y nuevos en materia de investigación salmón acuícolas.



Queremos dar un especial agradecimiento a todo nuestros colaboradores e investigadores académicos, privados y públicos que hacen un

aporte para cada edición semestral con artículos de divulgación científica en materia de biotecnología, patologías, antivirales, vacunas, micro y macro algas, pesquería entre otras.

Consolidando la publicación revista técnica de divulgación Versión Diferente como un medio de consulta diaria.

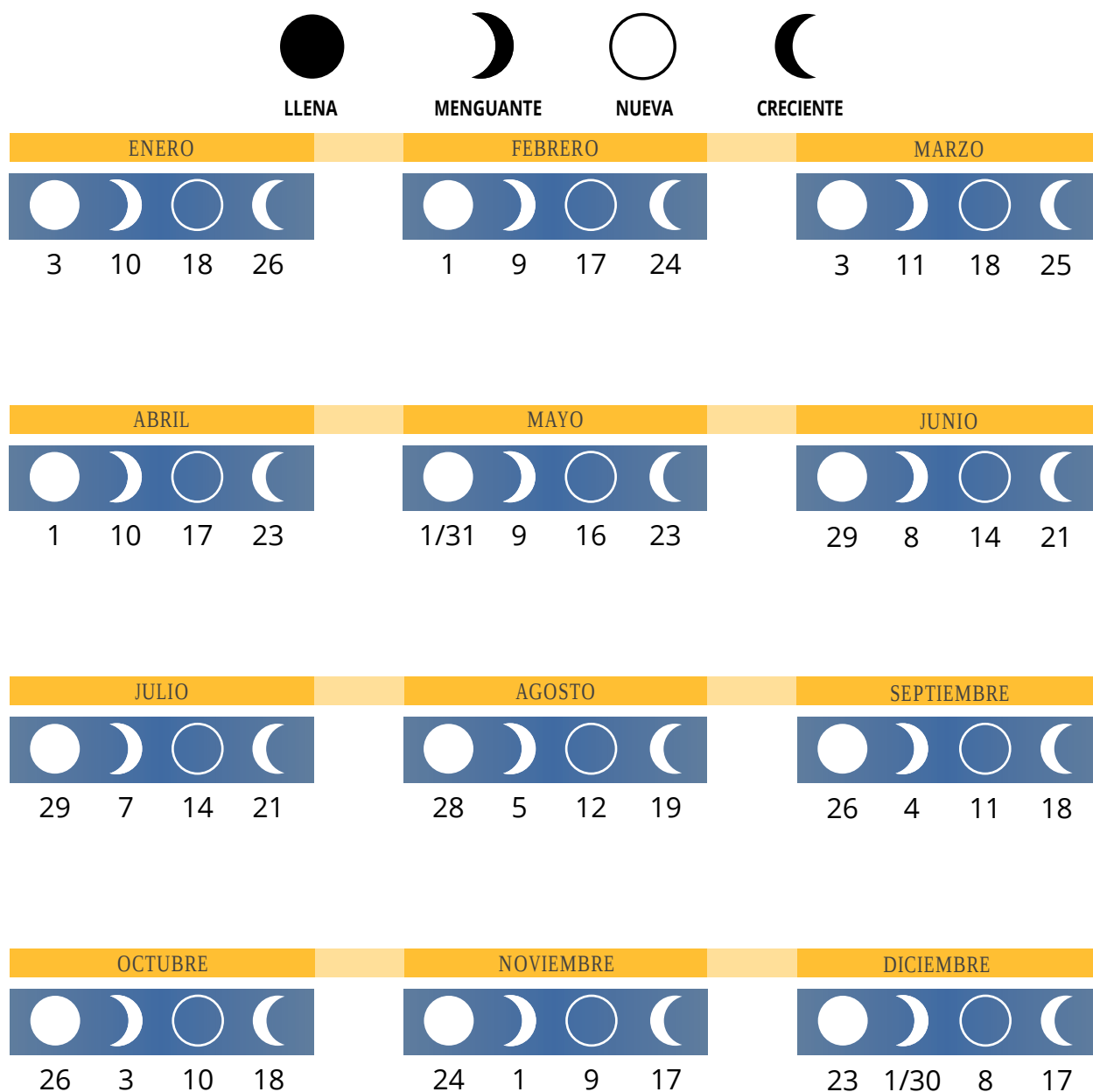
Continuamos manteniendo el cambio de fecha de cada edición semestral debido a circunstancias externas ajenas a nuestra agenda.

Los invitamos a participar en próxima edición especial digital e impresa, Segundo semestre 2026.

Queremos destacar a nuestros colaboradores especiales: UACH VALDIVIA X CONGRESO LATINOAMERICANO Y CHILENO DE INVESTIGACIÓN Y CIENCIA DE LA ANTÁRTICA, Julio 2025 y AquaBC CHILE, CONGRESO LAQUA PUERTO VARAS, Octubre 2025. Donde fuimos invitados para obsequiar la Revista Versión Diferente 2025.

Richard Araya Véliz
Gerente Comercial
Revista Versión Diferente

FASES LUNARES 2026



* Si necesita información de Mareas y Lunas solicitarlas directamente a www.shoa.cl o serviciosaterceros@shoa.cl

Ferias Internacionales 2026

ENERO	26 ~ 28	SIMEC AQUAFISH 2026	Riad – Arabia Saudita
	9 ~ 11	WORLD SEAFOOD CONGRESS 2026	Chennai - India
	16 ~ 19	AQUACULTURE AMERICA 2026	Las Vegas – USA
FEBRERO	16 ~ 19	AQUACULTURE AMERICA	San Antonio – Texas - USA
	18 ~ 19	AQUAFARM	Pordenon - Italia
	22 ~ 24	FISH INTERNATIONAL TRADE FAIR FOR FISH AND SEAFOOD	Bremen – Alemania
	3 ~ 5	THE NORTH ATLANTIC SEAFOOD FORUM - NASF 2026	Bergen – Noruega
	4 ~ 5	13TH ANNUAL WORLD OCEAN SUMMIT EXPO 2026	Montreal - Canadá
MARZO	12 ~ 14	FISHING & COMPAÑÍA TRADE SHOW 2026	Sao Pablo - Brasil
	15 ~ 17	SEAFOOD PROCESSING NORTH AMERICA 2026	Boston - USA
	18 ~ 20	AQUACULTURE VIETNAM 2026	Ho chi Minh City - Vietnam
	24 ~ 26	AQUASUR 2026	Puerto Varas- Chile
	21 ~ 23	SEAFOOD EXPO GLOBAL	Barcelona - España
ABRIL	21 ~ 23	SEAFOOD EXPO GLOBAL 2026	Bruselas - Bélgica
	12 ~ 13	AQUACULTURE UK 2026	Aviemore – United Kingdom
MAYO	19 ~ 21	KOREA SEAFOOD SHOW 2026	Seoul – South Korea
	19 ~ 21	SEAGRICULTURE WORLD 2026	Bangkok - Thailand
	3 ~ 5	WORLD AQUACULTURE SINGAPORE 2026	Southern – Singapore
JUNIO	16 ~ 17	AQUACULTURE UK 2026	Glasgow – Escocia UK
	24 ~ 26	AQUACULTURE PHILIPPINES PASAY International trade fair for aquaculture, nutrition, health and production	Philippines

Feriados Internacionales

2026



Jueves 1 Enero	Día de Año Nuevo	●	●	●	●	●	●
Lunes 12 Enero	Día de la Mayoría de Edad					●	
Lunes 19 Enero	Día de Martin Luther King Jr.			●			
Miércoles 11 Febrero	Día de la Fundación Nacional					●	
Lunes 16 Febrero	Cumpleaños de Washington			●			
Lunes 23 Febrero	Cumpleaños del Emperador					●	
Viernes 20 Marzo	Equinoccio de Primavera					●	
Jueves 2 Abril	Jueves Santo				●		
Viernes 3 Abril	Viernes Santo	●	●		●		●
Lunes 6 Abril	Lunes de Pascua		●		●		
Miércoles 29 Abril	Día de Showa	●				●	
Viernes 1 Mayo	Día del Trabajo	●			●		
Domingo 3 Mayo	Día de la Constitución					●	
Martes 5 Mayo	Día del Niño					●	
Lunes 18 Mayo	Día de Victoria		●				
Jueves 21 Mayo	Día de las Glorias Navales	●					
Lunes 25 Mayo	Día de los Caídos			●			
Lunes 25 Mayo	Spring Holiday						●
Domingo 21 Junio	Día Nacional de los Pueblos Indígenas	●					
Lunes 29 Junio	San Pedro y San Pablo	●					
Miércoles 1 Julio	Día de Canadá		●				
Sábado 4 Julio	Día de la Independencia			●			
Jueves 16 Julio	Día de la Virgen del Carmen	●					
Lunes 20 Julio	Día del Mar					●	
Lunes 3 Agosto	Día de Verano						●
Martes 11 Agosto	Día de la Montaña					●	
Sábado 15 Agosto	Asunción de la Virgen	●					
Lunes 7 Septiembre	Día del Trabajo		●	●			
Viernes 18 Septiembre	Día de la Independencia	●					
Sábado 19 Septiembre	Día de las Glorias del Ejército	●					
Lunes 21 Septiembre	Día del Respeto a los Ancianos					●	
Martes 22 Septiembre	Día Nacional					●	
Miércoles 23 Septiembre	Equinoccio de Otoño					●	
Miércoles 30 Septiembre	Día Nacional por la Verdad		●				
Lunes 12 Octubre	Encuentro de Dos Mundos	●	●	●			
Sábado 31 Octubre	Día de las Iglesias Evangélicas	●					
Domingo 1 Noviembre	Todos los Santos	●					
Martes 3 Noviembre	Día de la Cultura					●	
Miércoles 11 Noviembre	Día de los Veteranos		●	●			●
Lunes 23 Noviembre	Día de Acción de Gracias por el Trabajo					●	
Jueves 26 Noviembre	Día de Acción de Gracias			●			
Martes 8 Diciembre	Inmaculada Concepción	●					
Viernes 25 Diciembre	Navidad	●	●	●	●		●
Sábado 26 Diciembre	Día de San Esteban		●		●		●



EL ESTRÉS EN PECES NO SE VE... SE MIDE

El estrés es un factor invisible que afecta la salud de los peces; VeHiCe utiliza ciencia aplicada para cuantificarlo objetivamente.



Evaluación Objetiva mediante Biomarcadores

Se analizan los niveles de cortisol, lactato y glucosa en sangre para determinar el estado fisiológico real del animal.



Cortisol

Indicador primario de la respuesta de estrés en peces ante estímulos agudos o crónicos.



Lactato

Refleja el esfuerzo físico y el metabolismo anaeróbico derivado del manejo o transporte.



Glucosa

Medida de la movilización de energía como respuesta secundaria al estrés.

Beneficios Estratégicos



Detección Multifactorial

Permite identificar impactos negativos causados por manejos, transporte y condiciones ambientales.



Parámetros Comparables

Métodos analíticos estandarizados que permiten una comparación entre grupos y tiempos.



Soporte para Decisiones Críticas

Herramienta esencial para optimizar decisiones sanitarias, productivas y de bienestar animal en la salmonicultura.

Estrés monitoreado con PATOLOGÍA CLÍNICA

Transformamos la histopatología y la clínica en datos accionables desde el alevinaje hasta la cosecha.

www.VEHICE.com



Compendio actualizado de patologías no infecciosas en Salmónidos



Carlos Sandoval, Gabriella Squella, Paola Olmos, Marcelo Vera

RESULTADOS

Las patologías no infecciosas han adquirido una relevancia creciente en la acuicultura de salmónidos, impulsadas por sistemas de cultivo más intensivos, mayores tasas de crecimiento, ambientes controlados y nuevos desafíos fisiológicos asociados a la calidad del agua, la nutrición y el manejo. Aunque suelen presentarse de manera silenciosa, estas lesiones pueden afectar bienestar, crecimiento, desempeño en mar y calidad del producto final. Este artículo revisa de manera sintetizada las principales patologías no infecciosas observadas en salmónidos como nefrocalcinosis, deformidades esqueléticas, cataratas, melanosis y cuadros tóxicos, integrando mecanismos, factores predisponentes y su relevancia productiva.

NEFROCALCINOSIS

La nefrocalcinosis corresponde a la precipitación de minerales, principalmente sales de calcio y fósforo, dentro del riñón, generando aumento de tamaño, cambio de coloración, depósitos blanquecinos y alteración de la función renal. Afecta la osmorregulación, reduce el crecimiento y aumenta la susceptibilidad a estresores y a enfermedades secundarias (Smart *et al.*, 1979; Klykken *et al.*, 2020; Takvam *et al.*, 2023).

Su origen es multifactorial, pero los factores ambientales desempeñan un rol central. La exposición prolongada a CO₂ genera acidosis respiratoria, que los peces compensan aumentando el bicarbonato plasmático. Si estos peces son sometidos luego a una disminución brusca de CO₂, como ocurre en manejos, movimientos o cambios de estanque, se produce un aumento rápido del pH interno que favorece la sobresaturación y precipitación mineral en la pre-orina. Emadi *et al.* (2026) confirmaron este mecanismo utilizando un modelo in vitro que replicó la precipitación asociada a la caída de CO₂ y mostró que temperaturas más altas aceleran la cinética de formación de depósitos.

Los sistemas RAS son particularmente susceptibles debido a la acumulación crónica de CO₂, bicarbonato, calcio y fósforo, junto con el uso sostenido de oxígeno suplementario que reduce la

ventilación branquial y limita la excreción de CO₂ (Skov, 2019; Wood & Jackson, 1980). En contraste, los sistemas de flujo abierto presentan variaciones bruscas de gases y salinidad que pueden desencadenar lesiones más severas. Klykken *et al.* (2020) reportaron prevalencias de 48% en smolts provenientes de RAS (predominantemente leves) y 33% en FTS (más severos), lo que refuerza la influencia del tipo de sistema.

Adicionalmente, la evidencia científica indica que los depósitos observados en nefrocalcinosis de salmónidos corresponden principalmente a fosfatos de calcio, especialmente en forma de apatita carbonatada amorfa, que se forma cuando el sistema renal entra en condiciones de sobresaturación mineral. No obstante, se han descrito otros tipos de cristales, como oxalato cálcico, fosfatos magnésicos o estruvita, cuya presencia se asocia a mecanismos fisiopatológicos distintos, por lo que la composición del depósito constituye un indicador útil para inferir la causa subyacente (Klosterhoff *et al.*, 2015; Klykken *et al.*, 2022). En VEHICE, el análisis directo de estos depósitos mediante microscopía electrónica ha permitido confirmar, en casos clínicos provenientes de sistemas RAS en Chile, la composición de los cristales renales, lo que permite sugerir su posible causalidad.

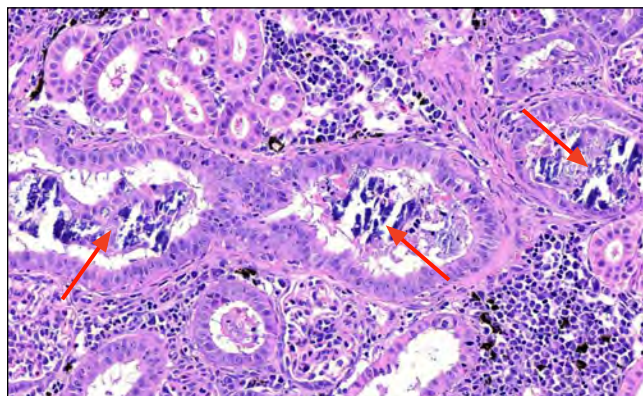


Imagen 1: Histología de riñón con depósitos minerales (flechas) en túbulos renales consistentes con nefrocalcinosis en smolt de *S. salar* en RAS (fuente: VeHiCe).

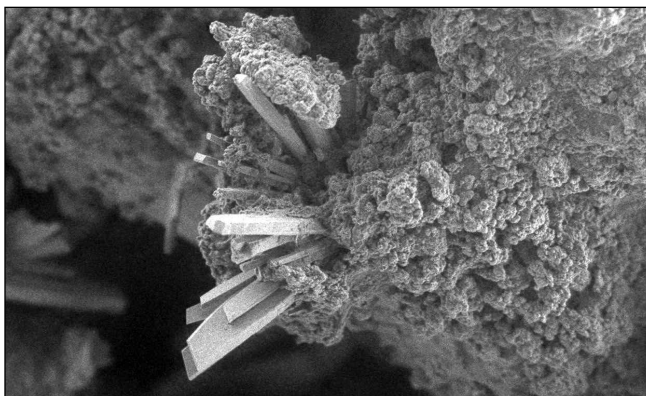


Imagen 2: Microscopía electrónica de cristales renales en smolt de *S. salar* en RAS (fuente: VeHiCe).

DEFORMIDADES ESQUELÉTICAS

Las deformidades esqueléticas representan un desafío transversal en el cultivo de salmónidos, dada la alta sensibilidad del esqueleto a la nutrición, la temperatura, el estrés inflamatorio y la carga mecánica. Factores ambientales adversos durante etapas tempranas, especialmente temperaturas sobre 8-10 °C, hipoxia, pH inestable y contaminantes, pueden interferir con la mineralización y favorecer alteraciones en la notocorda y el desarrollo vertebral (De Clercq *et al.*, 2017; Castro *et al.*, 2011).

Las deformidades vertebrales incluyen lordosis, escoliosis, cifosis, fusiones y compresiones. Estudios de Fjellidal *et al.* (2009, 2012) describen que deficiencias de fósforo y vitamina C, así como exceso de vitaminas A o D, aumentan la susceptibilidad del esqueleto a fallas estructurales. Experimentos realizados por VeHiCe y Aquagen Scotland mostraron que temperaturas elevadas (11°C) durante la primera alimentación se asocian a fusiones y compresiones, mientras que temperaturas de 4 - 8 °C no generaron alteraciones, lo que coincide con literatura internacional.

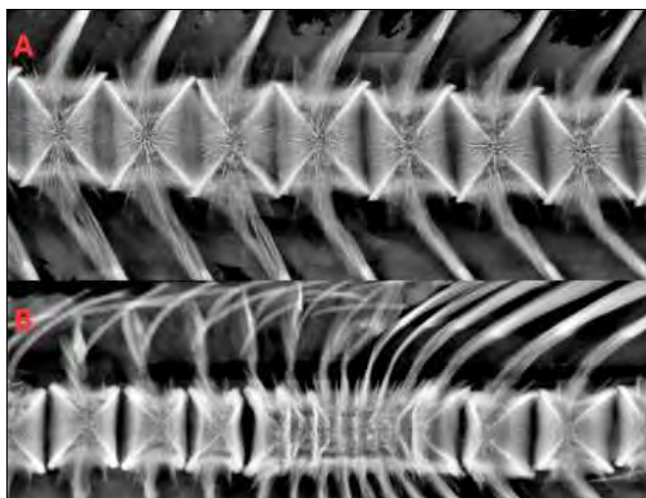


Imagen 3: Radiografía de estructura vertebral sana (A). Compresión y fusión de cuerpos vertebrales (B). (fuente: VeHiCe).

Las costillas y pin bones también presentan alteraciones relevantes. Desviaciones costales se han asociado a lesiones musculares como focos de melanosis (Jiménez-Guerrero *et al.*, 2022). Los pin bones, estructuras clave en la transmisión de fuerza, pueden presentar deformaciones que generan problemas operacionales en planta (Schroeder *et al.*, 2019; Lyall *et al.*, 2024).

Las deformidades mandibulares, como LJD (Lower Jaw Deformity), SJ (Short Jaw) y MA (Malaligned Jaw), afectan captura de alimento y respiración, disminuyendo el crecimiento. En condiciones extremas, como en casos de "Screamer Disease", se observan alteraciones como anquilosis mandibular, ablandamiento óseo y deformidades vertebrales asociadas a deficiencia mineral bajo temperaturas elevadas (Roberts *et al.*, 2001).

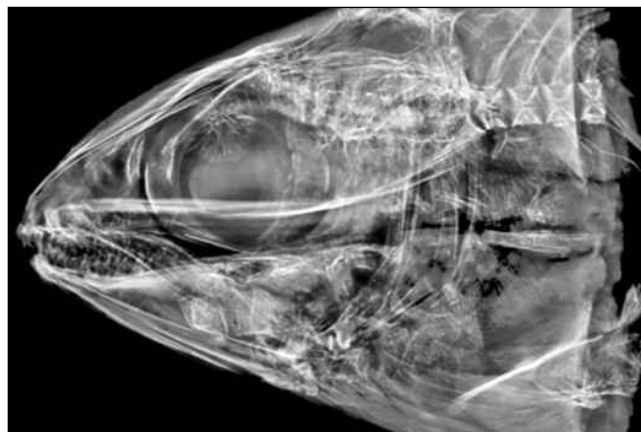


Imagen 4: Radiografía de estructuras óseas de cráneo normales de *S. salar*. (fuente: VeHiCe).



Imagen 5: Radiografía de *S. salar* consistente con "Screamer Disease" asociado a deficiencia de fósforo y sometidos a altas temperaturas y/o rápido crecimiento. (fuente: VeHiCe).

CATARATAS

Las cataratas corresponden a opacidades en el cristalino que reducen la visión y afectan la alimentación, la eficiencia de conversión y el crecimiento. Poseen etiología multifactorial: deficiencias nutricionales, especialmente de histidina, zinc y vitamina C; daño osmótico por cambios bruscos de salinidad; radiación UV; temperaturas elevadas; y parasitismo (Bjerkås *et al.*, 2004; Ferguson, 2022).

El cristalino del pez es metabólicamente activo y depende de su epitelio para mantener la claridad mediante regulación osmótica. Cualquier proceso que altere esta función, como deshidratación osmótica, daño epitelial o estrés oxidativo, produce tumefacción de fibras, cambios degenerativos y pérdida de transparencia.

Estudios en salmón del Atlántico indican que altas temperaturas (18 - 20 °C) y dietas bajas en histidina aumentan significativamente la incidencia (Sambraus *et al.*, 2017).

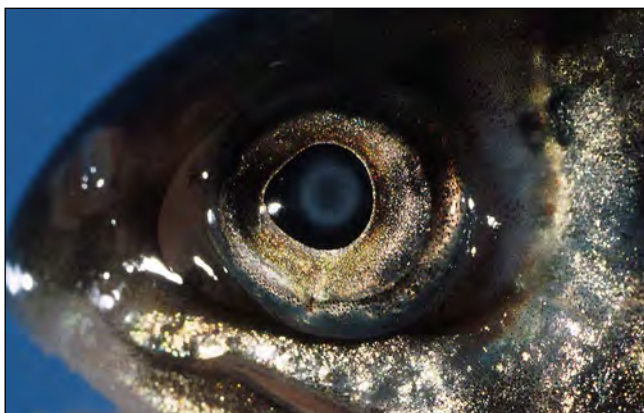


Imagen 6: Catarata por deficiencia nutricional de metionina inducida experimentalmente en trucha arcoíris (cortesía de Hugh Ferguson)

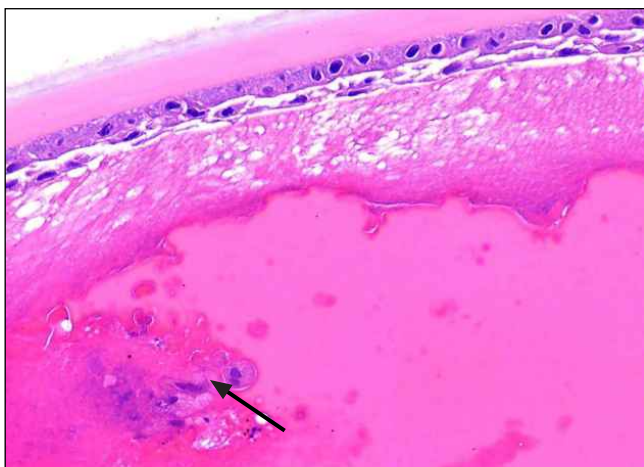


Imagen 7: Histología del lente con coagulación de fibras del cristalino (flecha) consistente con cataratas maduras en *S. salar*. (fuente: VeHiCe).

Las cataratas osmóticas pueden ser reversibles si no existe daño permanente de fibras, pero otras formas, especialmente las inducidas por UV o toxinas, pueden llegar a ser rápidamente irreversibles.

En términos productivos, las cataratas afectan el desempeño de los peces al comprometer la capacidad de localizar y capturar alimento, lo que se traduce en menor ingesta, peor eficiencia de conversión y reducción en las tasas de crecimiento. Si bien algunas formas, particularmente las cataratas osmóticas tempranas, pueden ser reversibles, otras lesiones generan daño permanente del cristalino. En conjunto, las cataratas representan una patología de alto impacto funcional, cuyo control depende del manejo integrado de la nutrición, la temperatura y las condiciones ambientales a lo largo del ciclo productivo.

MELANOSIS

La melanosis muscular consiste en la acumulación de melanina en tejido esquelético, originando lesiones oscuras focales en el filete que afectan la calidad comercial. Su etiología es multifactorial e involucra inflamación crónica, microlesiones musculares, hipoxia tisular y alteraciones en la reparación (Agius & Roberts, 2003; Bjørgen *et al.*, 2019).

Estudios recientes han demostrado que la melanosis no es solo un proceso pigmentario, sino una respuesta inmunitaria local mediada por melanomacrófagos, asociados a daño muscular previo, desviaciones costales o compresiones vertebrales (Jiménez-Guerrero *et al.*, 2024). La revisión de Bjørgen *et al.* (2025) destaca que la producción de melanina es parte de un programa de reparación tisular, análogo a procesos inflamatorios crónicos en vertebrados.

Factores predisponentes incluyen: traumatismos musculares durante manipulación, hipoxia, inflamación asociada a patógenos subclínicos, alta energía dietaria y desbalances metabólicos que favorecen estrés oxidativo. La prevalencia y severidad aumentan en peces de mayor tamaño y en sistemas donde las tasas de crecimiento son elevadas.



Imagen 8: Histología del lente con coagulación de fibras del cristalino (flecha) consistente con cataratas maduras en *S. salar*. (fuente: VeHiCe).

TOXICOLOGÍA AMBIENTAL

Los salmónidos son altamente sensibles a la química del agua, y compuestos como metales, gases disueltos y especies nitrogenadas pueden generar toxicidad aguda o subclínica. La toxicología ambiental es especialmente relevante en RAS, donde la recirculación favorece acumulación de compuestos y reduce los márgenes de seguridad fisiológica (Wedemeyer, 1996).

Entre los metales más relevantes se encuentran aluminio, cobre y hierro. Su toxicidad depende de pH, dureza y ligandos: el aluminio es más tóxico en aguas blandas y ácidas, mientras que el cobre interfiere con la Na⁺/K⁺-ATPasa y altera la regulación iónica branquial (Handy, 2003; Playle & Wood, 1990). El hierro precipitado recubre laminillas branquiales, produciendo hipoxia funcional. Lesiones típicas incluyen necrosis epitelial, edema y congestión.

Otros tóxicos críticos incluyen CO₂, amonio/amoniaco, nitrito y sulfuro de hidrógeno. El CO₂ elevado causa acidosis respiratoria, hipercapnia y alteración del apetito. El amoniaco (NH₃), altamente tóxico, produce daño neurológico y renal (Randall & Tsui, 2002). El nitrito oxida hemoglobina a metahemoglobina, generando “brown blood disease”. El H₂S, incluso en niveles traza, puede inducir mortalidad aguda.

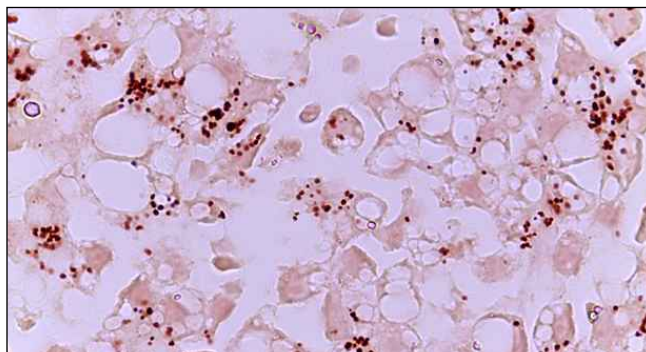


Imagen 9: Reacción moderada a cobre (puntos marrones) en citoplasma hepático en adulto de *S. salar*. (fuente: VeHiCe)

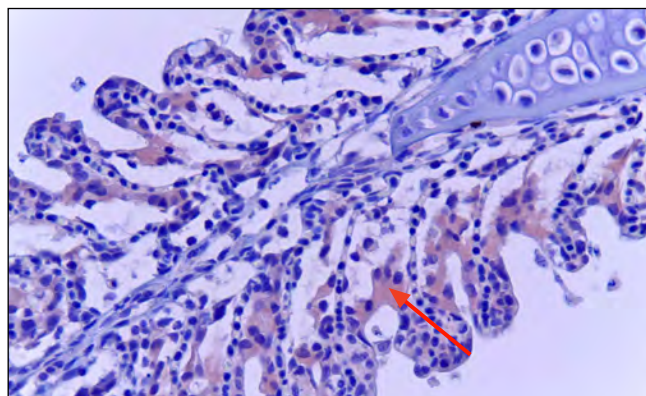


Imagen 10: Marcador fisiológico por inmunohistoquímica de cambios patológicos de la hemoglobina en casos de mortalidad aguda con sospecha de H₂S en branquia de smolt de *S. salar* en RAS (fuente: VeHiCe).

En conjunto, estos compuestos representan un desafío constante para smolts y peces en sistemas intensivos, donde variaciones menores en pH o temperatura modifican la toxicidad real. El monitoreo continuo, la interpretación correcta de la química del agua y el diagnóstico histopatológico son fundamentales para prevenir episodios clínicos.

Para concluir, las patologías no infecciosas descritas comparten mecanismos fisiopatológicos interrelacionados que reflejan la estrecha dependencia del pez respecto del ambiente, la nutrición y el manejo. Sistemas intensivos, dietas de alta energía, temperaturas elevadas y variaciones en la química del agua reducen los márgenes fisiológicos y favorecen la expresión de lesiones subclínicas. Una aproximación integrada —que combine monitoreo ambiental, formulación nutricional adecuada, manejo cuidadoso y diagnóstico especializado— es esencial para anticipar desequilibrios y reducir su impacto sanitario y productivo.

BIBLIOGRAFÍA

Agius, C., & Roberts, R. J. (2003). Melano-macrophage centres and their role in fish pathology. *Journal of Fish Diseases*, 26(9), 499–509.

Aqua Kompetanse AS. (2020). *Incidence of nephrocalcinosis in Norwegian farmed salmon*. FHF / NEFROSMOLT Project Report.

Bjerkås, E., Holst, J., & Bjerkås, I. (2004). Cataract in farmed and wild Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Animal Eye Research*, 3–13.

Bjerkås, E., Holst, J., Bjerkås, I., & Ringvold, A. (2003). Osmotic cataracts cause reduced vision in wild Atlantic salmon postsmolts. *Diseases of Aquatic Organisms*, 55, 151–159.

Bjørgen, H., Wessel, Ø., Timmerhaus, G., Gu, J., Dahle, M. K., Nyman, I. B., Rimstad, E., & Koppang, E. O. (2019). Histopathological characterization of red and melanised focal changes in skeletal muscle of Atlantic salmon. *Journal of Fish Diseases*, 42(7), 1007–1020.

Bjørgen, H., *et al.* (2025). Melanisation in salmonid skeletal muscle: A review. *Journal of Fish Diseases*.

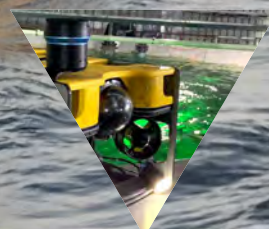
Castro, M. P., *et al.* (2011). Environmental stress and skeletal deformities in teleost fish. *Aquaculture Reports*.

De Clercq, A., Perrott, M. R., Davie, P. S., Preece, M. A., Huysseune, A., & Witten, P. E. (2017). The external phenotype-skeleton link in post-hatch farmed Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*). *Journal of Fish Diseases*, 41(3), 511–527.

Emadi, C. M., Wood, C. M., Takvam, M., Nilsen, T. O., & Brauner, C. J. (2026). Mechanistic links between acid-base regulation, CO₂ transitions and mineral precipitation: implications for nephrocalcinosis in salmonids. *Aquaculture*, 613, 743354.

- Ersdal, C., Midtlyng, P. J., & Jarp, J. (2001). An epidemiological study of cataracts in seawater-farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Diseases of Aquatic Organisms*, 45, 229–236.
- Ferguson, H. W. (2006). *Systemic pathology of fish: A text and atlas of normal tissues in teleosts and their responses in disease* (2nd ed.). Scotian Press.
- Ferguson, H. W. (2022). Cataracts in fish – pathology and histopathology. *FishHistopathology.com*.
- Fivelstad, S., Olsen, A. B., Kløften, H., Ski, H., & Stefansson, S. (1999). Effects of carbon dioxide on Atlantic salmon smolts at constant pH in bicarbonate rich freshwater. *Aquaculture*, 178(1–2), 171–187.
- Fjelldal, P. G., Hansen, T., Breck, O., Sandvik, R., Waagbø, R., Berg, A., & Ørnsrud, R. (2009). Supplementation of dietary minerals during the early seawater phase increases vertebral strength and reduces deformities in Atlantic salmon smolt. *Aquaculture Nutrition*, 15, 366–378.
- Fjelldal, P. G., Hansen, T., Breck, O., Ørnsrud, R., Lock, E. J., Waagbø, R., Wargelius, A., & Witten, P. E. (2012). Vertebral deformities in farmed Atlantic salmon: Etiology and pathology. *Journal of Applied Ichthyology*, 28, 433–440.
- Handy, R. D. (2003). Toxic effects of metals in fish. In R. D. Handy (Ed.), *Fish Ecotoxicology*. Blackwell Science.
- Jiménez-Guerrero, R., Baeverfjord, G., Evensen, Ø., Hamre, K., Larsson, T., Dessen, J.-E., Gannestad, K.-H., & Mørkøre, T. (2022). Rib abnormalities and their association with focal dark spots in Atlantic salmon fillets. *Aquaculture*, 561, 738697.
- Jiménez-Guerrero, R., Baeverfjord, G., Evensen, Ø., & Mørkøre, T. (2024). Understanding morphological rib abnormalities in Atlantic salmon. *Aquaculture*, 591, 741140.
- Klosterhoff, M. C., Romano, L. A., Sampaio, L. A., Ramos, L., Tesser, M. B., & Romano, L. A. (2015). Nephrocalcinosis and kidney stones in teleost fish: pathological and mineralogical characterization. *Bulletin of the European Association of Fish Pathologists*, 35(4), 138–144.
- Klykken, C., Boissonnot, L., Kolarevic, J., Dalum, A. S., & Stensby-Skjærvik, S. (2022). Physiological changes observed in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) with nephrocalcinosis. *Aquaculture*, 554, 738104.
- Lyall, B. A., Witten, P. E., Carter, C. G., et al. (2024). The problems with pin bones: Intermuscular bone development and function in salmonids and their implications for aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 16(4), 1981–1995.
- Playle, R. C., & Wood, C. M. (1990). Water chemistry changes in relation to metal toxicity in fish. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 47, 1689–1697.
- Randall, D. J., & Tsui, T. K. N. (2002). Ammonia toxicity in fish. *Marine Pollution Bulletin*, 45, 17–23.
- Roberts, R. J., Hardy, R. W., & Sugiura, S. H. (2001). Screamer disease in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in Chile. *Journal of Fish Diseases*, 24(9), 543–549.
- Sambras, F., Fjelldal, P., Remø, S., Hevrøy, E. M., Nilsen, T., Thorsen, A., & Waagbø, R. (2017). Water temperature and dietary histidine affect cataract formation in Atlantic salmon smolt. *Journal of Fish Diseases*, 40, 1195–1212.
- Schroeder, M., et al. (2019). Structural variation of pin bones and implications for processing quality. *Aquaculture Research*.
- Skov, P. V. (2019). Carbon dioxide in aquaculture systems: Physiology, regulation and consequences. *Aquaculture*, 507, 135–145.
- Smart, G. R., Knox, D., Harrison, J. G., Ralph, J. A., Richards, R. H., & Cowey, C. B. (1979). Nephrocalcinosis in rainbow trout: The effect of exposure to elevated CO₂ concentrations. *Journal of Fish Diseases*, 2, 279–289.
- Wedemeyer, G. A. (1996). *Physiology of fish in intensive culture systems*. Chapman & Hall.
- Wood, C. M., & Jackson, E. B. (1980). Ventilation, gill gas transfer, and acid–base balance in fish. *Journal of Experimental Biology*, 88, 211–236.

RENTABILIZAMOS TU SIEMBRA



NUESTROS SERVICIOS

» BUCEO

» ROBÓTICA

» ARRIENDO DE
EMBARCACIONES



Contactos:

veronica.torres@divingtrapananda.cl
isabel.torres@divingtrapananda.cl

 +56 9 9072 4931

Mérida N° 1870 - Hacienda los Lagos
Puerto Montt - Región de los Lagos - Chile

www.divingtrapananda.cl

ÉL CÓDIGO DE LA MANCHA: PATRONES MOLECULARES ASOCIADOS A LA MELANOSIS EN EL FILETE DE SALMÓN



Rayen Collipal^{1, 2, 3}

¹ Centro Experimental Acuícola (CEA), Quillaipe, Chile.

² Departamento de I+D+i, Vitapro Chile.

³ Departamento de Feed Technology, Vitapro Chile.

INTRODUCCIÓN: DESARROLLO DE LA MELANOSIS

La melanosis en el salmón, específicamente manifestada como cambios focales melanizados (MFCs), también conocidos como "manchas negras" o "*blacks spots*", representa un problema de calidad significativo y una amenaza importante para la rentabilidad de la industria de la acuicultura del salmón del Atlántico en Chile (Aquabench, 2022).

Estas alteraciones generan grandes pérdidas económicas en Chile, mientras que en Noruega las pérdidas están estimadas entre 0.5 y 1 billón de coronas noruegas anualmente, afectando hasta el 20-30% de los filetes en la planta (Bjørger et al, 2025). La comprensión actual de la melanosis ha evolucionado significativamente a lo largo de más de dos décadas de investigación. Inicialmente, se creía que los MFCs eran el resultado de la vacunación, pero estudios posteriores revelaron que el salmón no vacunado bajo condiciones de cultivo también podía desarrollar estas manchas. Esto llevó a una búsqueda más profunda de otras causas etiológicas, incluyendo ingredientes dietéticos, agentes infecciosos y factores relacionados con el manejo (Bjørger et al, 2025; Bjørger et al, 2024, Wakamatsu, et al., 2023).

Las investigaciones más recientes han establecido que los MFCs son la etapa crónica de una condición inflamatoria que se inicia como cambios focales rojos (RFCs), a menudo denominados "manchas rojas" o "hemorragias" (Wakamatsu, et al., 2023). RFCs (manchas rojas), se caracterizan macroscópicamente por hemorragias y se presentan como lesiones rojizas en el filete. Histológicamente, los RFCs muestran necrosis muscular aguda, hemorragias y una respuesta inflamatoria aguda, sin la presencia general de melanomacrófagos ni granulomas organizados. La prevalencia de RFCs se mantiene relativamente estable, alrededor del 4%, durante el período de cría en agua de mar. Actualmente se ha descrito el proceso de "transición", es decir, se han identificado formas transitorias que exhiben características tanto de RFCs como de MFCs, lo que indica una clara progresión

de una manifestación aguda a una crónica (Bjørger et al, 2025; Bjørger et al, 2024).

MFCs representan la etapa crónica y avanzada de la condición. Histológicamente, los MFCs se caracterizan por una inflamación granulomatosa, fibrosis severa, destrucción del tejido y una acumulación abundante de melanomacrófagos (Agius & Roberts, 2003; Larsen et al., 2012). El pigmento responsable del color negro es la eumelanina derivada de DOPA (3,4-dihidroxifenilalanina). La eumelanina se produce localmente por las células pigmentadas dentro de las lesiones, a diferencia de ser simplemente fagocitada. Estas células, que se desarrollan a partir de células amelanóticas que expresan genes de la familia de la tirosinasa (como tirosinasa y *Tyrb1*), se melanizan a medida que la condición progresa (Wakamatsu, et al., 2023)

ETIOLOGÍA DE LA MELANOSIS

Se ha descrito que la melanosis focal (Figura 1.3), mancha negra definida, con un 70% de prevalencia en la zona crano-ventral en filete de salmónes, sobre todo en la especie del salmón del Atlántico (*Salmo salar*) con un 19% de presencia en planta de cosecha, mientras que para el salmón coho (*Oncorhynchus kisutch*) la prevalencia reportada es de 5% y para la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) es de 03%, en todos los casos es una condición compleja y de etiología multifactorial (Bjørger et al, 2024)

Es importante destacar que, en Chile, se ha reportado la presencia de melanosis extendida sobre todo en la región de los Aysén y Magallanes (Figura 1.2)

La evidencia científica más reciente sugiere que la hipoxia celular y la necrosis de la grasa. Las condiciones hipóxicas en los RFCs, probablemente causadas por hemorragias traumáticas, inducen una necrosis especializada del tejido adiposo (grasa). Esta necrosis grasa conduce a la liberación de material lipídico, la formación

de pseudoquistes y una reacción tipo mioesferulosis (una mezcla de lípidos y eritrocitos) (BjØrgen et al, 2025; BjØrgen et al, 2024). Aunque PRV-1 no es la causa inicial de los RFCs, su presencia está consistentemente asociada con los MFCs de alto grado con inflamación granulomatosa (Malik et al., 2021). El virus se replica activamente dentro de macrófagos y melanomacróforos en estas lesiones, actuando como un desencadenante crónico de la inflamación y modulando la progresión y severidad de la condición. La infección por PRV-1 induce un ambiente proinflamatorio con macrófagos M1 que luego se polarizan a M2 en las MFCs crónicas (BjØrgen & Koppang, 2024; Malik et al., 2021; Larsson et al., 2012). Los daños mecánicos/traumas y manejos/baños/muestreos son muy probables durante el ciclo de cultivo, por lo que los traumas físicos, incluidos los asociados con fracturas de costillas o el manejo excesivo de los peces, sean una causa de aparición de los RFCs, ya que los movimientos vigorosos del salmón pueden causar microtraumas y hemorragias (Wakamatsu, et al., 2023). La composición del alimento, especialmente el alto contenido de grasa y el desequilibrio de ácidos grasos (Omega-6 vs Omega-3), pueden aumentar la susceptibilidad en la prevalencia y severidad de los MFCs, por lo que utilizar una dieta más magra y rica en proteínas podría ser beneficiosa. El problema es específico del cultivo del salmón, por lo que las mismas prevalencias no se han observado en el salmón salvaje, lo que sugiere que las condiciones de cultivo, como la densidad de la población y la saturación de oxígeno, pueden influir en su aparición. Además, la menor incidencia de MFCs en salmones coho y la trucha arcoíris, a pesar de condiciones de cría similares, podría deberse a diferencias en el metabolismo lipídico y la acumulación de carotenoides eritrocitos (BjØrgen et al, 2025; Lutfi et al., 2023; Mock et al., 2019).

ESTUDIO TRANSCRIPTÓMICO

Con la finalidad de obtener nuevos datos a los reportados mediante los enfoques de estudios tradicionales descritos por la literatura científica. Se realizó un estudio transcriptómico a muestras de músculo con melanosis focal, extendida e inducida y muestras de músculo control.

Las ventajas del análisis del transcriptoma son:

1. Identificación de procesos biológicos no descritos previamente. El análisis transcriptómico ha permitido descubrir rutas moleculares y procesos celulares involucrados en la melanosis que no habían sido reportados en estudios anteriores (Beemelmans et al., 2021).

2. Mayor resolución temporal y espacial

A diferencia de los estudios histológicos o bioquímicos clásicos, la transcriptómica permite observar cambios dinámicos en la expresión génica en distintas etapas del desarrollo de la melanosis, desde las lesiones iniciales (RFCs) hasta las fases crónicas (MFCs) (BjØrgen et al., 2024).

3. Detección temprana y biomarcadores

Este enfoque puede ayudar a identificar biomarcadores tempranos de la histopatología, lo que facilitaría estrategias de prevención o intervención más eficaces (Leal et al., 2023).

4. Comprensión integral del sistema

Permite analizar simultáneamente miles de genes, ofreciendo una visión sistémica del fenómeno o hallazgo, en lugar de centrarse en unos pocos genes o proteínas (Taylor et al., 2022).

5. Aplicabilidad práctica en la industria

Los conocimientos generados pueden ser utilizados para desarrollar soluciones nutricionales o de manejo en la producción acuícola, con impacto directo en la calidad del producto y la rentabilidad (Valenzuela-Muñoz, et al., 2023).

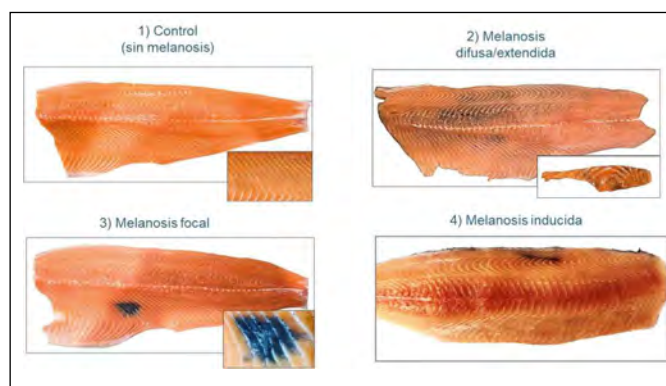


Figura 1: Fotografías de filetes de salmón del Atlántico con hallazgos de melanosis 2) Extendida, 3) Focal e 4) Inducida.

METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

Las muestras fueron obtenidas desde una planta de proceso de un productor de salmón de la región de Los Lagos, excepto la muestra correspondiente a la melanosis inducida, la cual fue obtenida desde el CEA (Centro Experimental Acuicola de Vitapro Chile), por medio de metodología estandarizada para producir

melanosis de manera controlada con un 96% de prevalencia. Para cada hallazgo se tomaron 6 muestras por grupo, a las cuales se les extrajo ARN mensajero total procurando la máxima pureza e integridad. Para luego ser enviadas a secuenciar a Corea del Sur con el apoyo técnico del laboratorio INNOVOGEN, Chile.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según el flujo de trabajo de un estudio transcriptómico, los resultados preliminares permiten obtener un análisis de componentes principales (PCA, en inglés), el cual permite visualizar agrupaciones o diferencias entre muestras (por ejemplo, entre músculo de salmones con y sin melanosis). La figura 2, presenta las comparaciones resultantes:

De la figura 2 se observan que los patrones de expresión de los genes diferencialmente expresados entre las comparaciones son distintos. A su vez, el patrón entre el gráfico 1) y el gráfico 2), son patrones similares, grupo control más cercano al PC2 y el grupo con melanosis cercano al PC1. A diferencia de la comparación del gráfico 2): Control vs Extendida, las muestras sin melanosis (control) y las muestras con melanosis, extendida si bien están agrupadas entre sí, los patrones de expresión resultaron más cercanos al PC2 y más lejanos del PC1, lo que indica que las diferencias entre grupos son más sutiles en esta comparación 2) que en las anteriores 1) y 3). Luego se identificaron la totalidad de genes diferencialmente expresados (figura 3)

De la figura 3 se observa que el orden de magnitud expresión de los Genes Diferencialmente Expresados (DEGs, sigla en inglés) del gráfico 1) y 3) son cercanos entre sí (104). Ya que para la comparación Control vs Focal resultaron 10.711 DEGs mientras para la comparación Control vs Inducida resultaron 11.220 DEGs. Mientras que para la comparación 2): Control vs Extendida la magnitud de DEGs fue 2.288 (103).

Con esta información y mediante un análisis de enriquecimiento se identificaron las rutas o procesos biológicos en los que intervienen los DEGs (figura 4).

De la figura 4, se observa en verde los procesos biológicos donde los genes que intervienen están sobreexpresados, ahí los procesos que destacan son los relacionados al sistema inmune, señales de transducción, a la organización de la matrix extracelular, apoptosis, mientras que los procesos subexpresados destacan la contracción muscular, metabolismo del ARN y el metabolismo en general.

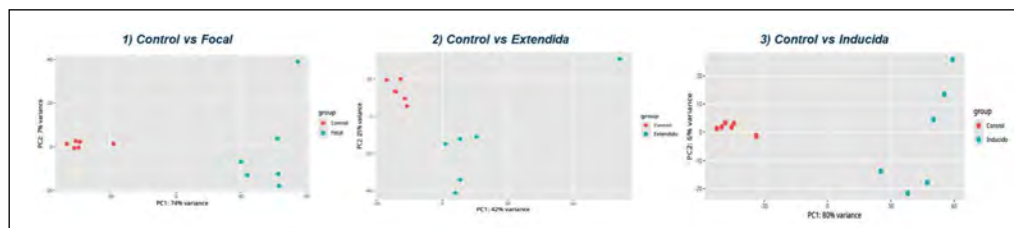


Figura 2: Gráficas resultantes del análisis de componentes principales para las comparaciones de interés: 1) Control vs Focal; 2) Control vs Extendida; 3) Control vs Inducida.

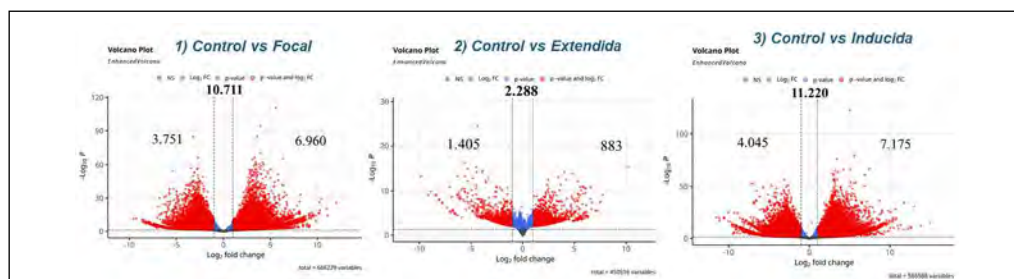


Figura 3: Gráfico de volcán para visualizar la relación entre el cambio de expresión (Log_2 fold change) y la significancia estadística ($-\log_{10}$ p-valor) de los genes diferencialmente expresados para: 1) Control vs Focal; 2) Control vs Extendida; 3) Control vs Inducida. Se observa en cada gráfica la cantidad total de genes diferencialmente expresados, a la izquierda los subexpresados y a la derecha sobreexpresados diferencialmente.

Los procesos descritos son compartidos entre las muestras de músculo con melanosis focal y con melanosis inducida.

Mientras que las rutas biológicas que se sobreexpresan cuando se comparan las muestras sin melanosis con melanosis extendida son las señales de traducción (expresión génica), metabolismo de proteínas, metabolismo del ARN y el sistema inmune. Las rutas subexpresadas son el transporte de moléculas pequeñas y el ciclo celular sobre todo en su fase G2 (figura 4, 3). Solo al visualizar los resultados obtenidos por el Reactome, se infiere que tanto la noxa (daño o causa inicial) como su desarrollo en el músculo es diferente al origen y desarrollo de la melanosis focal.

PATRONES MOLECULARES ASOCIADOS A LA MELANOSIS FOCAL

Con la información obtenida de las comparaciones de las muestras control, sin melanosis y las muestras con melanosis focal e inducida. En la figura 5 se plantea un esquema con los potenciales patrones moleculares involucrados en el desarrollo de la melanosis focal.

POTENCIALES CAUSAS DE LA MELANOSIS FOCAL

Una de las interacciones con otras rutas ya comentadas a la apoptosis, fue la inflamación, la reparación del ADN, y la senescencia celular. En la figura 7, se observa que la ruta biológica descrita para la senescencia celular presentó la totalidad de los genes diferencialmente expresados.

Las rutas KEGG (del inglés *Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes*), ofrece una visión integrada y esquemática de los procesos que conducen a la senescencia. Los cuales incluye: 1) vías de señalización clave: *p53*, *p16^{INK4a}/Rb*, *MAPK*, *PI3K-Akt*; 2) factores desencadenantes: daño en el ADN, oncogenes, estrés oxidativo y 3) efectores celulares: detención del ciclo celular, secreción de SASP (fenotipo secretor asociado a senescencia).

La senescencia celular es un proceso en el que las células dejan de dividirse, pero no

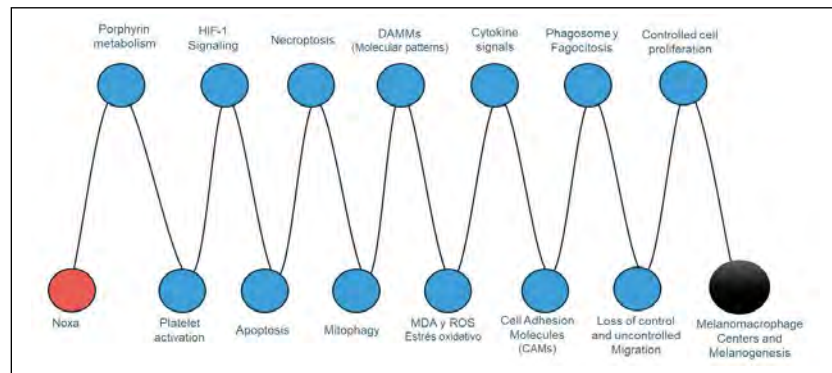


Figura 5: Esquema putativo sobre los patrones moleculares asociados a la melanosis focal. Se observa en rojo la noxa que desencadena la respuesta molecular involucrada en los RFCs (hemorragias) y la transición hacia los MFCs (melanosis).

Figura 4: Representación visual de Reactome® de los procesos biológicos donde intervienen los genes diferenciales sobreexpresados (verde) y subexpresados (rojo).

mueren (Antelo-Iglesias et al., 2021). Entran en un estado de reposo y liberan sustancias que pueden causar inflamación y daño a las células cercanas (Gems et al., 2021). Por lo tanto, es una célula que pierde estructura, por lo tanto, funcionalidad y se caracteriza por tener 1) morfología aplanada y agrandada; 2) actividad de la beta-galactosidasa asociada a la senescencia (*SA-b-gal*); 3) secreción de citoquinas inflamatorias, 4) factores de crecimiento y por presencia de metaloproteinasas de matriz, fenotipo secretor asociado a la senescencia (*SASP*).

CONCLUSIONES

La melanosis en el salmón atlántico bajo condiciones de cultivo intensivo es un problema complejo que se desarrolla a partir de hemorragias agudas (RFCs), que pueden ser iniciadas por trauma y condiciones hipóxicas celular que llevan a reacciones de necrosis de la grasa en el músculo. Estas lesiones iniciales pueden progresar hacia inflamaciones crónicas y melanizadas (MFCs), un proceso que es modulado y agravado por la persistencia y replicación del PRV-1.

La predisposición del filete a acumular grasa y las condiciones de cultivo también son factores clave en su desarrollo. Estudios transcriptómicos como el presente, que utilizan bases de datos biológicos como KEGG y Reactome, son herramientas poderosas para la investigación de rutas biológicas que están involucradas en el desarrollo de la melanosis en el músculo de salmones como la senescencia celular, la cual no ha sido reportada en trabajos anteriores.

Determinar los genes diferencialmente expresados y posicionarlos en procesos biológicos permite una comprensión rápida y visual de los procesos implicados, además, de que ofrecen una exploración profunda de los mecanismos moleculares implicados. Su uso en conjunto enriquece significativamente el análisis de datos ómicos y la interpretación biológica de los genes identificados para aplicarlos en el diseño, validación e implementación de potenciales biomarcadores durante el ciclo del cultivo del salmón.

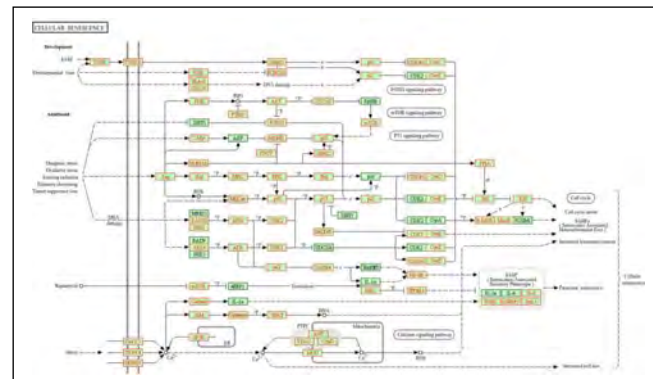


Figura 6: Ruta de senescencia celular en KEGG (map04218) presentada en función del estudio transcriptómico de melanosis focal e inducida.

BIBLIOGRAFIA

Aquabench Proyecto Melanosis:

<https://aquabench.com/en/2022/09/05/melanosis-project/>

Agius, C., & Roberts, R. J. (2003). Melano-macrophage centres and their role in fish pathology. *Journal of Fish Diseases*, 26(9), 499–509. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2761.2003.00485.x>

Antelo-Iglesias, L., Picallos-Rabina, P., Estévez-Souto, V., Da Silva-Álvarez, S., & Collado, M. (2021). The role of cellular senescence in tissue repair and regeneration. *Mechanisms of Ageing and Development*, 198(111528), 111528. <https://doi.org/10.1016/j.mad.2021.111528>

Bjørgen, H., Brimsholm, M., Asserson, C. F., Skaar, K., Knutsen, G. M., Oaland, Ø., Haldorsen, R., Fjellidal, P. G., Hansen, T., Rimstad, E., Kleist, B. A., Lund-Iversen, M., Kowalewski, M. P., & Koppang, E. O. (2024). Deciphering the pathogenesis of melanized focal changes in the white skeletal muscle of farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Journal of Fish Diseases*, 47(10), e13988. <https://doi.org/10.1111/jfd.13988>

Bjørgen, H., Haldorsen, R., Oaland, Ø., Kvellestad, A., Kannimuthu, D., Rimstad, E., & Koppang, E. O. (2019). Melanized focal changes in skeletal muscle in farmed Atlantic salmon after natural infection with Piscine orthoreovirus (PRV). *Journal of Fish Diseases*, 42(6), 935–945. <https://doi.org/10.1111/jfd.12995>

Bjørgen, H., Rimstad, E., & Koppang, E. O. (2025). Melanisation in Salmonid skeletal muscle: A review. *Journal of Fish Diseases*, 48(3), e14063. <https://doi.org/10.1111/jfd.14063>

Gems, D., Kern, C. C., Nour, J., & Ezcurra, M. (2021). Reproductive suicide: Similar mechanisms of aging in *C. elegans* and pacific salmon. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 9, 688788. <https://doi.org/10.3389/fcell.2021.688788>

Krasnov, A., Moghadam, H., Larsson, T., Afanasyev, S., & Mørkøre, T. (2016). Gene expression profiling in melanised sites of Atlantic salmon fillets. *Fish & Shellfish Immunology*, 55, 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2016.05.012>

Leal, Y., Valenzuela-Muñoz, V., Casuso, A., Benavente, B. P., & Gallardo-Escárate, C. (2023). Comparative Transcriptomics in Atlantic Salmon Head Kidney and SHK-1 Cell Line Exposed to the Sea Louse Cr-Cathepsin. *Genes*, 14(4), 905. Doi: 10.3390/genes14040905.

Larsen, H. A. S., Austbø, L., Mørkøre, T., Thorsen, J., Hordvik, I., Fischer, U., Jirillo, E., Rimstad, E., & Koppang, E. O. (2012). Pigment-producing granulomatous myopathy in Atlantic salmon: A novel inflammatory response. *Fish & Shellfish Immunology*, 33(2), 277–285. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2012.05.012>

Larsson, T., Mørkøre, T., Kolstad, K., Østbye, T.-K., Afanasyev, S., & Krasnov, A. (2012). Gene expression profiling of soft and firm Atlantic salmon fillet. *PloS One*, 7(6), e39219. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0039219>

Lutfi, E., Berge, G. M., Bæverfjord, G., Sigholt, T., Bou, M., Larsson, T., Mørkøre, T., Evensen, Ø., Sissener, N. H., Rosenlund, G., Sveen, L., Østbye, T.-K., & Ruyter, B. (2023). Increasing dietary levels of the n-3 long-chain PUFA, EPA and DHA, improves the growth, welfare, robustness and fillet quality of Atlantic salmon in sea cages. *The British Journal of Nutrition*, 129(1), 10–28. <https://doi.org/10.1017/s0007114522000642>

Malik, M. S., Bjørgen, H., Nyman, I. B., Wessel, Ø., Koppang, E. O., Dahle, M. K., & Rimstad, E. (2021). PRV-1 infected macrophages in melanized focal changes in white muscle of Atlantic salmon (*Salmo salar*) correlates with a pro-inflammatory environment. *Frontiers in Immunology*, 12, 664624. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.664624>

Mock, T. S., Francis, D. S., Jago, M. K., Glencross, B. D., Smullen, R. P., Keast, R. S. J., & Turchini, G. M. (2019). The impact of dietary protein: lipid ratio on growth performance, fatty acid metabolism, product quality and waste output in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture (Amsterdam, Netherlands)*, 501, 191–201. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.11.012>

Valenzuela-Muñoz, V., Gallardo-Escárate, C., Valenzuela-Miranda, D., Nuñez-Acuña, G., Benavente, B. P., Alert, A., & Arevalo, M. (2023). Transcriptome Signatures of Atlantic Salmon—Resistant Phenotypes against Sea Lice Infestation Are Associated with Tissue Repair. *Genes*, 14(5), 986. <https://doi.org/10.3390/genes14050986>

Wakamatsu, K., Dijkstra, J. M., Mørkøre, T., & Ito, S. (2023). Eumelanin detection in melanized focal changes but not in red focal changes on Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(23). <https://doi.org/10.3390/ijms242316797>



La Buena Energía para cada desafío

Diseñamos e implementamos planes
energéticos integrales a tu medida

- ♥ Diagnóstico y asesoría energética
- ♥ Generación eléctrica con Gas Licuado de Petróleo
- ♥ Cogeneración: Generación de Electricidad y calor en un solo sistema
- ♥ Generación de agua caliente de alta eficiencia
- ♥ Apoyo en la transición energética, conversión de equipos para operación con Gas Licuado
- ♥ Calefacción de grandes superficies
- ♥ Generación de vapor

Soluciones confiables para un futuro más sostenible

Contáctanos y solicita tu evaluación.

📞 600 500 6000

💻 📱 lipigas.cl

Caso Nefrocalcinosis y Síndrome Hemorrágico del Smolt



ACP Ltda.

Jorge Martínez Aguayo

Gerente Técnico, Médico Veterinario

ANTECEDENTES

Este es un hallazgo en terreno realizando asistencia post venta y corresponde a peces salmón del Atlántico cultivados en piscicultura de Flujo abierto abastecida de río de origen lacustre. Peces de un peso promedio de 170 gramos en avanzado estado de esmoltificación, con ATP asa de 20 mmol, con muy buen factor de condición: $K=1,32$. Los parámetros ambientales son: $T^{\circ} 9,6^{\circ}$ y $11,9$ mg/L de oxígeno y saturación de 105%. Debido al estado avanzado de esmoltificación los peces presentan fragilidad de escamas y se encuentran cursando un cuadro de fungosis que se está controlando con una estrategia de baños semanales con un químico en base a ácidos orgánicos, una vez por semana alternando con dos baños de formalina durante cuatro semanas semanales con y formalina. Los peces presentan grado variable de nefrocalcinosis y de Síndrome Hemorrágico del smolt, lo que se evidencia en la necropsia (Foto 1 y Fotos 2 y 3). Se realiza un análisis de sangre empleando el dispositivo portátil ISTAT) Abbot), usando el Cartridge EC8+, cuyos resultados se muestran en la tabla 1.



Imagen 3: Se observa que se demarcan los uréteres.



Imagen 1: Pez con signología SHS



Imagen 2: Sangre de pez con SHS (izquierda) y pez normal (derecha)

Parámetro	Valor	Referencias
Na mmol/L	149,0	150 - 155
K mmol/L	4,70	2,9 - 4,9
Cl mmol/L	125,50	135: < 140
GLU mg/dl	108,00	60 - 100
HcT %	21,00	35 - 45
Hb g/dl	7,13	8,9 - 12
pH ajustado T°	7,42	7,0 - 7,1
PO2 (mmHg) Ajustado	ND	15 - 21
PCO2 Ajustado	10,46	5 - 7
HCO3 por fórmula	10,27	6 . 8,9
TCO2 por fórmula	10,58	5,2 - 6,5
sO2 (%)	N/D	40 - 60
CO2 ppm agua	ND	≤ 2

Tabla 1: Valores obtenidos en terreno de salares cursando Nefrocalcinosis y Síndrome Hemorrágico del smolt.

Perfil Bioquímico Salares	
Peces normales	
Parámetro	Intervalo
ALP U/I	66- 667
ALT U/L	10'- 38
AST U/L	22-729
Creatinina	9 - 80
Ca+2 mmol/L	2,1-3.4
Mg+2 mmol/l	0,7 - 1,5
PO4= mmol/L	2.4 - 8.1
Na+ mmol/L	149-169
K+ mmol/L	1.5 - 4.9
Cl- mmol/L	
Na+/K+	30-103
Osmolalidad	305 - 343
Glucosa mmol	3.7 - 8.7
Lactato	2,1 - 10.1
Urea	0.6 - 1.7

Tabla 2: Valores de bioquímica clínica reportados en la bibliografía en salare. (Klykken, et al.; 2022).

RESULTADOS

Con respecto a los valores obtenidos de gasometría: la pCO₂ ésta se encuentra aumentada coincidente con el pH aumentado. Si bien es cierto el CO₂ puede ser normal a bajo en el agua del estanque, puede ocurrir que en sangre esté levemente aumentada, sin estar fuera de los rangos. Esto es debido a alguna modificación histopatológica que compromete la arquitectura branquial o de otros órganos, como el riñón y en por exceso de detritus orgánico y cambio en la calidad del agua que en este caso particular por lixiviación posterior a una lluvia. Aquí las branquias se encuentran normales con buena arquitectura y no se observaron signos de hiperplasia branquial. Valores normales de pCO₂ en sangre esperados serían de 4,5 a 8 mm Hg en sangre. En los peces normales el pH sanguíneo es neutro (normal), pero en este caso el pH sanguíneo está aumentado (alcalino). Tabla 1.

Los valores de electrolitos: normales a excepción de cloro que cursa con valor por debajo de lo normal; Hipocloremia concomitante con hiperbicarbonatemia. Lo que significa que los peces están compensando para mantener su homeostasis. Posterior a obtener las muestras de sangre, se procedió a realizar necropsia de estos peces. Dentro de los hallazgos los peces presentaron signos que son coincidentes con aquellos descritos para Síndrome hemorrágico del smolt (Foto 1). Hay hiperglicemia. Anemia, sangre con nula viscosidad (Foto 2). También hay hallazgo de Nefrocalcinosis en distinto grado (Fotos 3 y 4). El hematocrito al igual que la hemoglobina se encuentran con valores bajos. La hiperbicarbonatemia registrada es coincidente con TCO₂ y pCO₂ aumentadas, mantiene la homeostasis evidenciada por la leve alcalemia sanguínea.

La hiperbicarbonatemia, con el potasio aumentado son indicadores de que los peces están con desbalance acidosis/alcalosis que puede deberse a un valor de CO₂ alto en el agua, debido a la alta densidad de cultivo. Con este potasio y bicarbonato aumentados es esperable que curse con hipocloremia.

- Electrolitos: Sodio, Cloro y Potasio: Los valores de los electrolitos plasmáticos determinados en este caso encuentran con valores normales a excepción del ion cloruro. Los valores referenciales se observan en Tabla 1 y corresponden; sodio con rango de 150 a 155 mmol/L; cloro, 135 a 140 mmol/L y finalmente potasio con rango de 2,9 a 4,9 mmol/L.
- pH sanguíneo: El pH registrado es 7,42 que significa que hay alcalemia.
- Oxígeno, CO₂, PCO₂.

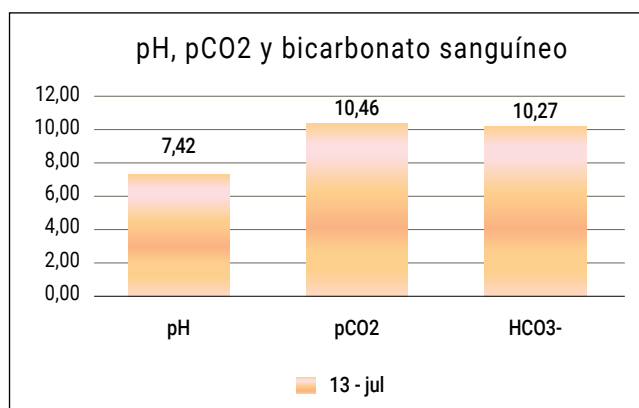


Grafico 1: Valores promedio de pH, pCO₂ y bicarbonatos sanguíneos determinados en salares en caso clínico.

DISCUSION

En la última etapa de agua dulce, cercano a la transferencia al mar la causa de mortalidad es atribuible a la fungosis que se controla mediante la aplicación de químicos en el agua. En este caso en particular es concomitante con hallazgos de nefrocalcinosis y Síndrome hemorrágico del smolt. Los peces estuvieron mantenidos con una densidad de cultivo promedio de 30 Kg/m³; con un peso promedio de 170 Gramos. Los peces se observaron con signos evidentes de estar bien esmoltificados lo que denota que están con una eficiente capacidad osmoregulatoria.

Dentro de los hallazgos, lo más relevante es que la presión de oxígeno en sangre (pO₂ y la saturación de oxígeno sO₂%) son bajas, la pO₂ y sO₂ bajas probablemente se puedan explicar por la relación que exista entre O₂ y CO₂ disuelto en agua condicionado por los altos valores de pCO₂ en sangre y su directa relación con la densidad de cultivo. Cuando la densidad de cultivo aumenta, se genera mayor CO₂ en agua y sabemos que existe competencia entre estos elementos por ligarse a la hemoglobina. Es así como el CO₂ (y también el CO), desplazan al oxígeno de la sangre afectando la unión a Hemoglobina. Lo paradójico es que

la concentración de oxígeno disuelto y la saturación son adecuados, pero no se conocen los valores de CO₂ disuelto y por otra parte se tiene una densidad de cultivo de 30 Kg/m³.

En un caso reportado en la literatura, investigando truchas arco iris en crianza (*Oncorhynchus mykiss*) en un sistema de recirculación intensiva (Tabla 3 y 4). Los pasos de diagnóstico adicionales necesarios para asegurar el éxito incluyeron la obtención de datos comparativos para perfiles de sangre de peces sin signología y peces con signología y se registraron los antecedentes de calidad agua. En el caso de la piscicultura los hallazgos de necropsia confirman ambas presentaciones patológicas. Los principales eventos en la fisiopatología de la nefrocalcinosis podrían resumirse de la siguiente manera: hiperoxia e hipercarbia del ambiente acuático → hipercapnia sanguínea → alteración del equilibrio ácido-base sanguíneo (acidosis respiratoria) → compensación metabólica (elevación del bicarbonato sanguíneo y excreción renal de fosfato) → aumento del pH sanguíneo →

precipitación y depósito de fosfato cálcico en los tejidos. Este caso destaca la necesidad de considerar la interacción entre la calidad del agua y la salud de los peces para al diagnosticar enfermedades los peces y establecer diagnósticos causales. En este hallazgo de terreno, además del perfil bioquímico registrado las necropsias realizadas apoyan bastante.

La nefrocalcinosis, descrita como depósitos minerales dentro del riñón, se observa cada vez con más frecuencia. Sin embargo, se sabe poco sobre su frecuencia y gravedad. En un estudio, se muestrearon 810 salmones del Atlántico de 14 grupos de peces diferentes en criaderos en Mid-Norway y granjas marinas receptoras. Se examinaron los riñones para detectar nefrocalcinosis mediante métodos histopatológicos y se diagnosticó nefrocalcinosis en todos los grupos de peces. La prevalencia y la gravedad del trastorno variaron ampliamente entre las instalaciones. La mayoría de los peces (68%) tenían formas leves de nefrocalcinosis, exhibiendo como máximo un daño tisular insignificante, mientras que los peces afectados por formas graves

Parámetros ambientales			
Parámetro		Afectados	Control
T°	°C	13,4	15,5
O ₂	(%)	129,3	102,4
pH		6,97	7,85
CO ₂	mg/L	10,68	10,5
ANC	mmol/L	0,85	0,65
N- NH ₄	mg/L	0,09	
N- NO ₂	mg/L	0,17	0,06
N- NO ₃	mg/L	53,3	98
P-O ₄	mg/L	1,83	1,91
Cl-	mg/L	75,5	133,8
Ca+2	mg/L	77,15	61,13

Tabla 3: Parámetros ambientales

Bioquímica clínica			
Parámetro		Afectados	Control
HCT		0,34	0,36
Hb		73	87
RBC		0,79	1,16
VCM	fl	450	314
HCM	pg	95	67,7
CMHC	g/L	0,21	2,4
WBC		17,33	30
Na+	mmol/L	136	141
K+	mmol/L	6,14	6,48
Cl-	mmol/L	112	113
Ca+2	mmol/L	2,23	2,42
P	mmol/L	3,74	4,53
Glucosa	mmol/L	4,19	4,07
TG	mmol/L	3,16	1,47
Colesterol	mmol/L	5,62	6,79
Prot. Totales	g/L	31,7	30
pH		7,32	6,97
pCO ₂	mmol/L	9,31	2,14
TCO ₂	mmol/L	38,6	4,9
HCO ₃	mmol/L	36,55	3,69
EB	mmol/L	10,53	-28,12

Tabla 4: Bioquímica clínica truchas

de nefrocalcinosis tenían una pérdida casi completa de la estructura del riñón. Independientemente de la gravedad de la nefrocalcinosis, los depósitos minerales se encontraron principalmente en forma de apatita de carbonato amorfa (amCAP), un mineral dominado por calcio. En consecuencia, a la mayoría de los peces afectados por nefrocalcinosis se les diagnosticó hipercalcemia. Los peces afectados por formas moderadas y graves de nefrocalcinosis también presentaron niveles elevados de magnesio plasmático, glucosa y aspartato aminotransferasa (AST). Es probable que estos desequilibrios en la química plasmática indiquen una osmorregulación alterada y un aumento de los niveles de estrés. Por lo tanto, los resultados de este estudio sugieren que la nefrocalcinosis es un problema de bienestar común y grave en el salmón del Atlántico que requiere un mejor seguimiento.

Dos aspectos importantes de destacar es la la presentación de nefrocalcinosis gástrica evidenciable por histopatología que se presenta en peces de menor gramaje, El otro aspecto es la génesis del problema según las dietas empleadas. Desbalances de minerales o la calidad y cantidad de proteína podrían estar asociados. Este último es un tema para debatir e investigar.

CONCLUSIONES

Aún cuando los peces presentan concomitante cuadro de nefrocalcinosis, signos de Síndrome hemorrágico del smolt, y cuadro de fungosis y tratamientos continuos con químicos, desarrollan el proceso de osmoregulación de manera eficiente respondiendo con niveles de ATP asa altos, manteniendo una condición adecuada evidenciándose roustos. Es probable que la alimentación y la dieta entregadas fueron los adecuados generando una respuesta favorable. En este seguimiento faltó registrar el tipo de dieta entregada y sus características, así como faltó incorporar el perfil completo de calidad de agua.

BIBLIOGRAFÍA

Fish Medicine de Stoskopf.

Introduction to Fish Physiology, Lynwood Smith. 1982.

Sveinung Fivelstad. Harald Haavik, Geir Løvik, Anne Berit Olsen¹¹ Sublethal effects and safe levels of carbon dioxide in seawater for Atlantic salmon postsmolts (*Salmo salar* L.): ion regulation and growth. Aquaculture, 1998.

Sveinung Fivelstad a Rune Waagbø b Sigurd Stefansson c Anne Berit Olsen salmon (*Salmo salar* L.). Impacts of elevated water carbon dioxide partial pressure at two temperatures on Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) parr growth and haematology. Aquaculture 2007.

Safina Musa, 2013. The effects of oxygen saturation and carbón dioxide concentration on growth. Aquaculture.

Yovita John Mallya, 2007. The effects of dissolved oxygen on fish growth in Aquaculture.

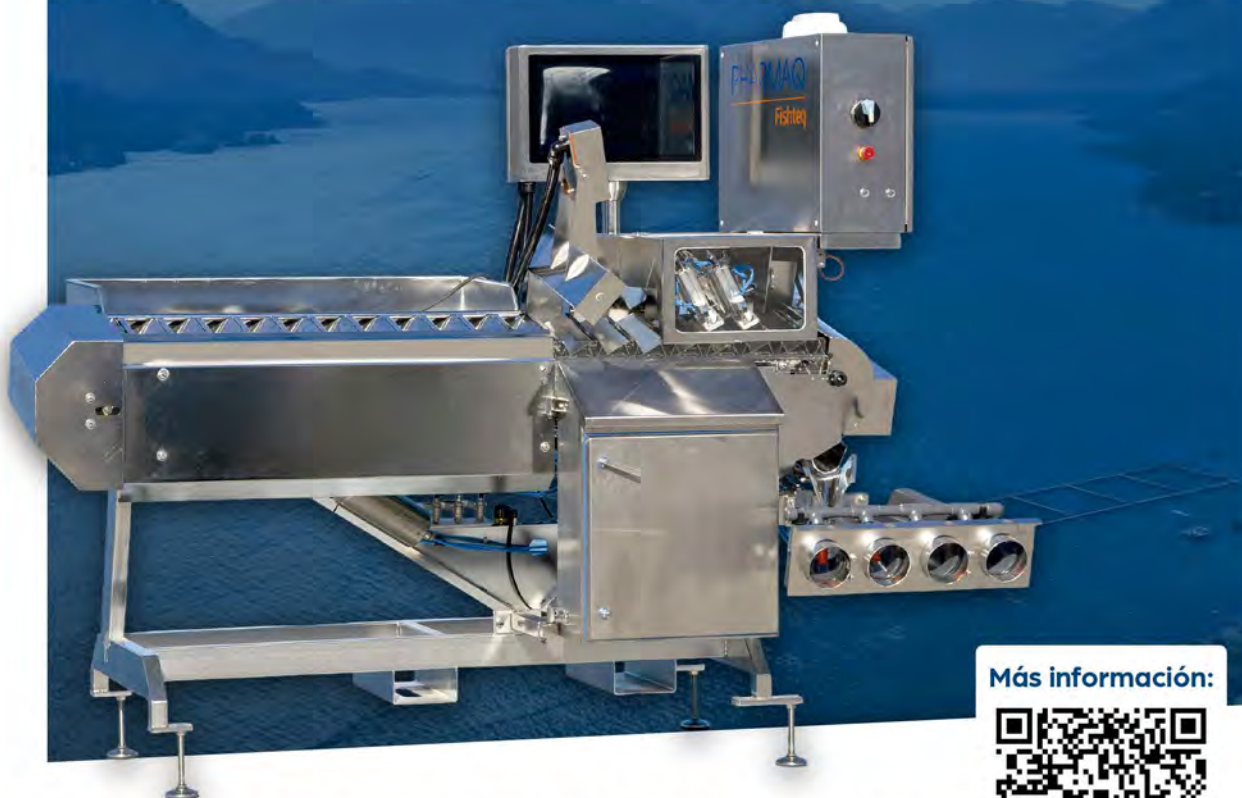
Klykken a,b,*, A.K. Reed c, A.S. Dalum d, R.E. Olsen b, M.K. Moe e, K.J.K. Attramadal b, L. Boissonnot aPhysiological changes observed in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar* .)L. with nephrocalcinosis. Aquaculture 554 (2022).

Hana Minarova^{1,2}, Miroslava Palikova^{1,3†}, Radovan Kopp³, Ondrej Maly³, Jan Mares³, Ivana Mikulikova¹, Ivana Papezikova^{1,3}, Vladimir Piacek¹, Lubomir Pojezdal² and Jiri Pikula^{1,3*†}. Nephrocalcinosis in farmed salmonids: diagnostic challenges associated with low performance and sporadic mortality. Frontiers in Veterinary Science. (2023).

PHARMAQ
part of zoetis

NFT25

Tecnología que impulsa la salmonicultura nacional



Haz crecer tu producción con innovación y confianza



Vacunación automatizada y clasificación inteligente de peces.
Registro en tiempo real para máxima eficiencia y bienestar animal.

Más información:



We make aquaculture progress



pharmaq.com

Propiedad de PHARMAQ. Cualquier copia no autorizada, la reproducción, la contratación, los préstamos, la ejecución pública y la redistribución de este documento está terminantemente prohibido.
MM-46561

Vacunación automatizada mediante tecnología NFT: desempeño técnico, eficiencia productiva y bienestar animal en la aplicación en Chile



Hanne Andersen¹, Jorge Navarro², Manuel Mejía³, Jorge Díaz⁴, Susan Duhalde⁴

¹ PHARMAQ Fishteq, Noruega

² PHARMAQ Ltd., Reino Unido

³ PHARMAQ Fishteq SpA, Chile

⁴ PHARMAQ AS Chile

RESUMEN

La máquina de vacunación NFT, desarrolladas por PHARMAQ Fishteq, parte de Zoetis, ha transformado la administración de vacunas en la acuicultura, al introducir procesos altamente automatizados, precisos y coherentes con los estándares internacionales de bienestar animal. Con más de 130 equipos instalados a nivel global (Figura 1), la tecnología NFT se utiliza para vacunar especies como salmón, trucha, bacalao, tilapia y otras, en sistemas productivos de distinta escala. Este artículo revisa la experiencia internacional y en Chile, destacando particularmente la operación de una máquina doble NFT25 en

una piscicultura chilena durante el 2025. Se analizan las ventajas operativas, los desafíos técnicos y el impacto en el bienestar animal, consolidando el rol de la tecnología NFT como un pilar en la producción acuícola sostenible.

INTRODUCCIÓN

La industria acuícola enfrenta crecientes desafíos para administrar múltiples vacunas, junto con mayores exigencias en eficiencia, trazabilidad y bienestar animal, lo que ha convertido a la automatización en un requisito estratégico para el sector,



Figura 1: Presencia global PHARMAQ Fishteq. Desde nuestros inicios en Noruega hasta hoy, las máquinas NFT están presentes en América, Europa y Asia-Pacífico, con 131 equipos operando a nivel mundial, vacunando distintas especies y acompañando el crecimiento de la acuicultura en múltiples países.

especialmente ante el aumento de los volúmenes de peces y la diversificación de especies cultivadas. Este desafío es compartido tanto por países con una larga tradición acuícola, como Noruega y también en mercados como Chile.

En este contexto, la máquina de vacunación NFT de PHARMAQ Fishteq han sido una respuesta a estas demandas, ofreciendo una solución tecnológica robusta y adaptable. Desde su desarrollo inicial en Noruega, la tecnología NFT ha evolucionado en estrecha relación con las necesidades reales de la producción acuícola, integrándose progresivamente en distintos sistemas productivos y especies. La automatización de la vacunación permite optimizar tiempos, reducir el trabajo manual, disminuir el error humano y asegurar una dosificación precisa y repetible en cada pez. El recorrido de la máquina NFT desde Noruega hacia otros mercados refleja no solo su madurez tecnológica, sino también su versatilidad. Su adopción en Europa, América, Asia y Oceanía demuestra que los principios que sustentan su diseño —precisión, innovación, flexibilidad y bienestar animal— son transversales a la acuicultura global.

METODOLOGÍA

La máquina NFT es un sistema automatizado de vacunación diseñado para administrar entre una y cuatro vacunas de forma simultánea, mediante inyección vía intraperitoneal o intramuscular. Esta flexibilidad permite adaptar el proceso a distintas especies, tamaños de peces y programas sanitarios. La implementación del sistema requiere condiciones específicas de montaje, calibración y puesta en marcha para asegurar una operación óptima.

La máquina se ha integrado exitosamente en distintas instalaciones, adaptándose a las necesidades y a la diversidad de los sistemas productivos. Un ejemplo concreto es Escocia, donde la máquina NFT (Figura 2) han permitido implementar la vacunación automatizada, asegurando altos estándares operativos y de bienestar animal.

En Chile, la puesta en marcha de la tecnología NFT alcanzó un hito relevante en 2025 con la operación de una máquina doble NFT25 en una piscicultura de altos estándares de infraestructura y bioseguridad. Este avance se concretó en el denominado “Centro de Vacunación Ecosalmon”, donde los equipos fueron incorporados al diseño arquitectónico de la sala de vacunación, proceso que fue validado por las autoridades locales.

El despliegue de esta tecnología en Ecosalmon se realizó en función de las necesidades específicas de la piscicultura, evidenciando la versatilidad de las máquinas NFT y su capacidad para entregar



Figura 2: La tecnología NFT destaca por su versatilidad y capacidad de adaptación a múltiples especies de interés en acuicultura.

soluciones a medida, adaptables a distintos sistemas y realidades productivas.

La metodología incluyó la instalación, configuración técnica, capacitación intensiva del personal y el establecimiento de protocolos estrictos de operación y mantenimiento preventivo. Ambos equipos, equipados con sistema de sexaje, fueron calibrados para adaptarse a distintos tamaños de peces y optimizar el flujo de trabajo. La evaluación técnica contempló simulaciones de flujo con peces reales, verificación automática de conteo y dosificación, monitoreo de la población de peces y comparaciones de rendimiento respecto de métodos manuales tradicionales.

RESULTADOS

A nivel global, la máquina NFT permitió vacunar más de 86 millones de peces durante 2024, con más de 130 equipos operativos en distintos países, la mayoría de ellos fuera de Noruega. Esto equivale a 9.817 peces por hora, las 24 horas del día, durante todo el año. Estos resultados reflejan la consolidación de la tecnología NFT como una solución madura y confiable. En Chile, durante 2025, la operación de la máquina doble NFT25 permitió alcanzar velocidades de vacunación de hasta 120.000 peces por turno, superando los 5 millones de peces vacunados en el primer año de operación.

Durante la fase inicial se programó la vacunación de cerca de 500.000 peces en dos semanas, con pruebas exhaustivas de detección automática, precisión en la dosificación y monitoreo de la respuesta biológica. El análisis comparativo con métodos manuales evidenció una reducción significativa de los tiempos de proceso y una mayor consistencia en la aplicación de vacunas. Las pruebas funcionales demostraron mejoras sustantivas en eficiencia, control del proceso y trazabilidad, junto con una reducción observable del estrés y las lesiones en los peces. La máquina NFT operó en dos unidades epidemiológicas distintas, un aspecto clave que refleja la experiencia de PHARMAQ Fishteq

en gestión sanitaria bajo diversos escenarios productivos. Esta capacidad demuestra un manejo técnico sólido en bioseguridad, control de riesgos y toma de decisiones basada en evidencia, asegurando una operación segura y consistente. Los principales desafíos técnicos incluyeron la calibración precisa para ajustarse a diferentes tamaños de peces, manejo adecuado de sedación, supervisión constante del proceso y la importancia de una limpieza rigurosa para evitar contaminación cruzada. La integración de protocolos de mantenimiento y capacitación continua del personal resultó clave para el éxito operativo.

DISCUSIÓN

La experiencia acumulada en distintos países confirma que la máquina NFT representa un avance sustancial en la automatización de la vacunación en acuicultura. Tanto en Noruega y Escocia como en el caso de Chile, la tecnología ha demostrado

La clave del éxito radica en la combinación de una tecnología robusta con soporte técnico especializado, capacitación continua del personal y la correcta integración de protocolos operativos y de mantenimiento. En el caso chileno, la operación de una máquina doble NFT25 durante 2025 evidencia que la automatización no solo es viable, sino altamente eficiente en contextos productivos exigentes. La incorporación futura de sistemas de monitoreo remoto y análisis de datos en tiempo real se presenta como el siguiente paso para optimizar aún más el proceso.

CONCLUSIÓN

La máquina NFT de PHARMAQ Fishteq es una tecnología esencial para la automatización y el control de la vacunación en la acuicultura moderna. Sus ventajas en eficiencia, precisión, trazabilidad y bienestar animal han sido validadas tanto en contextos internacionales como en la experiencia local chilena, destacando especialmente la operación de una máquina doble NFT25 en una piscicultura durante 2025.

Se recomienda continuar fortaleciendo los programas de capacitación, mantener esquemas de mantenimiento preventivo y avanzar hacia la integración de tecnologías complementarias como el monitoreo remoto. La colaboración entre productores, técnicos y fabricantes será determinante para maximizar los beneficios de la automatización. La tecnología NFT no solo optimiza procesos, sino que contribuye de manera concreta al cumplimiento de los estándares internacionales de bienestar animal, promoviendo una acuicultura más eficiente y sostenible.

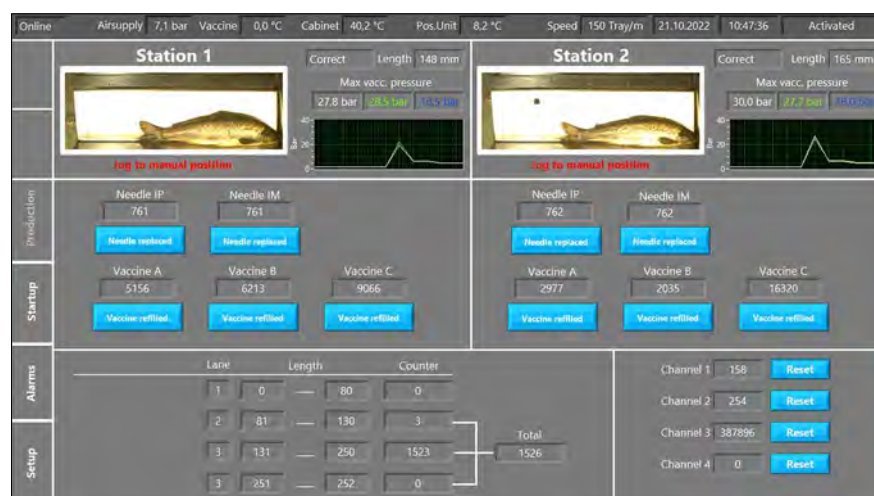


Figura 3: Interfaz del software de la máquina NFT durante el proceso de vacunación: la máquina captura una imagen de cada pez para medir su longitud y, además, utiliza estas imágenes para identificar peces que no están aptos para ser vacunados.

una alta flexibilidad de instalación, una sólida capacidad de adaptación a distintas especies y sistemas productivos, junto con mejoras significativas en el bienestar animal, lo que la posiciona como un estándar de la industria. Además, su integración exitosa en pisciculturas modernas ha permitido alcanzar rápidamente altos niveles de desempeño operativo.

En este ámbito, las nuevas tecnologías abren oportunidades relevantes, destacando la captura de datos basada en imágenes como una de las más prometedoras. La máquina NFT incorpora sistemas de visión que permiten registrar una imagen individual de cada pez para la medición de longitud (Figura 3) y, actualmente, estas imágenes son utilizadas además para identificar peces no aptos para la vacunación. Sobre esta base, se encuentra en desarrollo la integración de inteligencia artificial. El objetivo es mejorar la detección de peces con deformidades y asegurar una mayor calidad del pez, junto con mejores estándares de salud y bienestar animal.

REFERENCIAS

- World Organisation for Animal Health.
- Manual de bienestar animal en acuicultura.
- European Food Safety Authority. Guidelines on fish welfare.
- Royal Society for the Prevention of Cruelty to Animals. Standards for aquaculture.
- Informes técnicos de PHARMAQ Fishteq y PHARMAQ Chile Ltda.

Evaluación del bienestar en la producción de smolts en Chile



Sandra Bravo¹, Ana Strappini²; Nike Ponce¹

¹ Universidad Austral de Chile

² Wageningen Livestock Research, Netherlands
email: sandra.bravo.sbs@gmail.com



La producción de smolts en agua dulce es considerada una etapa clave para la industria del salmón a nivel mundial. La calidad de las ovas y de los smolts depende de la calidad de los reproductores, y el rendimiento productivo del salmón en la etapa de engorda en el mar depende de la calidad de los smolts. Está ampliamente documentado que los peces que no han completado adecuadamente el proceso de esmoltificación, o que solo lo han hecho de manera parcial, presentan problemas de osmorregulación al ser transferidos al mar, lo que se traduce en baja sobrevivencia, alta mortalidad y un crecimiento reducido en los individuos que logran sobrevivir (Noble y col. 2018; Khaw y col. 2021).

Las condiciones de cultivo y los factores ambientales juegan un papel determinante en este proceso. El estrés generado por un manejo inadecuado o por parámetros ambientales subóptimos pueden afectar al sistema inmunitario, el crecimiento y la reproducción en los peces, alterando el sistema endocrino, afectando el desarrollo y la calidad de los gametos, así como el

desarrollo y la supervivencia de los huevos y larvas (Schreck y col. 2001, Wagner y col. 2002). En este contexto, producir smolts robustos y bien esmoltificados no solo es deseable, sino esencial para asegurar una buena adaptación al ambiente marino y rendimiento productivo óptimo.

Con el fin de caracterizar el estado de bienestar de las especies salmonídeas criadas en agua dulce en el sur de Chile e identificar los indicadores más adecuados para evaluar el bienestar durante la producción de smolts, se desarrolló un estudio financiado por el Fondo de Investigación Pesquera y de Acuicultura (FIPA) mediante el Proyecto FIPA 2017-29. El estudio contó con la participación voluntaria de 54 pisciculturas, lo que representa el 36% de las instalaciones en operación en Chile. Estas fueron clasificadas según su sistema de producción (Tablas 1 y 2): 12 pisciculturas con sistemas de recirculación (RAS); 32 con sistemas de flujo abierto (FTS); 7 con sistemas de reutilización de agua (REU) y 3 con sistemas mixtos (FTS+RAS).

Tabla 1: Clasificación de las pisciculturas que participaron en el estudio, de acuerdo a la etapa de desarrollo de los peces, fuente de agua y sistema de producción: RAS (recirculación); FTS (flujo abierto); REU (reúso de agua), combinado (FTS+RAS).

Etapas de desarrollo	Fuente de agua	Sistema de Producción				TOTAL
		RAS	FTS	REU	FTS+RAS	
Reproductores & producción de ovas	agua de pozo	1				1
	agua de pozo / vertiente				1	1
	río		5			5
	vertiente		4			4
	agua de pozo / río	1	2	2	1	6
	agua de pozo / río / vertiente		1			1
Sub-total		2	12	2	2	18
Producción de smolt	agua de pozo	8			1	9
	agua de pozo / vertiente	1				1
	río	1	16	4		21
	vertiente		2	1		3
	río / vertiente		2			2
Sub-total		10	20	5	1	36
Total		12	32	7	3	54

Tabla 2: Pisciculturas usadas para relevar información sobre reproductores y producción de ovas (n=18) y producción de smolt (n=36), presentadas por especie salmonídea y sistema de producción.

Sistema de Producción	Especie Salmónídea	Etapas de desarrollo		
		Reproductores & ovas	Smolt	Total
FTS	salmón coho	3		3
	salmón del Atlántico - salmón coho	2	3	5
	salmón del Atlántico	3	8	11
	salmón del Atlántico - trucha arcoíris	1		1
	salmón del Atlántico - salmón coho - trucha arcoíris		4	4
	salmón del Atlántico - trucha arcoíris	3	5	8
FTS-RAS	salmón del Atlántico - salmón coho		1	1
	salmón del Atlántico	1		1
	salmón del Atlántico - trucha arcoíris	1		1
RAS	salmón del Atlántico	2	10	12
REU	salmón del Atlántico - salmón coho -		1	1
	salmón coho - trucha arcoíris	1		1
	salmón del Atlántico		3	3
	salmón del Atlántico - trucha arcoíris		1	1
	trucha arcoíris	1		1
Total		18	36	54

RESULTADOS

Treinta indicadores operacionales de bienestar (IOBs) fueron seleccionados como los más adecuados a partir de la literatura científica consultada y de la información obtenida mediante cuestionarios aplicados a los piscicultores que participaron en el estudio. La selección de los IOBs consideró tres aspectos: bienestar animal, viabilidad y costo económico. Estos indicadores, agrupados en 15 IOBs indirectos y 15 IOBs directos, fueron posteriormente validados en 16 pisciculturas que abarcaron las etapas de incubación, alevinaje y esmoltificación.

INDICADORES OPERACIONALES DE BIENESTAR (IOBs) INDIRECTOS

Según lo reportado por las pisciculturas participantes en el estudio, los 15 IOBs indirectos listados en la Tabla 3 son evaluados de manera rutinaria en las pisciculturas con recirculación de agua (RAS), mientras que solo seis indicadores se evalúan en las pisciculturas con flujo abierto (FTS). En ambos sistemas, el oxígeno, la temperatura y el pH son monitoreados mediante sensores en línea instalados en los estanques. En el caso de las pisciculturas RAS, el CO₂ es controlado diariamente y la mayoría de estas instalaciones indicó contar con laboratorios propios para el análisis de la calidad del agua, además de contar con servicios externos.

En ambos sistemas de pisciculturas, tanto RAS como FTS, se controla el caudal de agua (L/s) con el fin de asegurar entre uno a dos cambios de agua por hora, dependiendo del volumen de los estanques y del tamaño de los peces, favoreciendo así la evacuación de los desechos.

Aunque los productores señalaron que no miden la velocidad del agua en los estanques (expresada como longitud corporal por segundo), indicaron que ajustan el caudal del agua tomando la precaución de no afectar la normal natación de los peces.

Los piscicultores también informaron que la mortalidad y ejemplares moribundos son extraídos oportunamente y clasificados de acuerdo a lo establecido por SERNAPESCA en la Resolución Exenta 1468 (2012). En caso de observar signos patológicos, mortalidad anormal o cambios en el comportamiento normal de los peces, el personal notifica al equipo veterinario para la identificación de posibles problemas que pudieran afectar la salud y bienestar de la población.

INDICADORES OPERACIONALES DE BIENESTAR (IOBs) DIRECTOS

Tanto en las pisciculturas RAS como FTS, los 15 indicadores directos listados en la Tabla 4 fueron evaluados en terreno. Diez indicadores se midieron a nivel individual utilizando las escalas de puntuación propuestas por Noble y col. (2018). El estado de esmoltificación se evaluó utilizando la escala recomendada por la RSPCA (2018a, b). El daño asociado a la vacunación intraperitoneal se calificó utilizando la escala de Spielberg (Midtlyng y col. 1996).

Dentro del indicador “anormalidades” se incluyeron deformidades y nefrocalcinosis (Tabla 5). El salmón del Atlántico fue la especie que presentó la mayor frecuencia de deformidades, destacándose el acortamiento opercular y la compresión de las vértebras a nivel caudal como las más recurrentes. En el caso del salmón coho, la alteración más común fue la compresión de las vértebras a nivel caudal. La Nefrocalcinosis fue reportada principalmente en salmón del Atlántico en pisciculturas de flujo abierto.

Tabla 3: Indicadores Operacionales (IOBs) Indirectos medidos en las pisciculturas encuestadas, y agrupados de acuerdo al sistema de producción (RAS, FTS).

IOBs Indirectos	RAS		FTS	
	Reproductores & ovas	Smolt	Reproductores & ovas	Smolt
Calidad del agua				
Oxígeno	●	●	●	●
Temperatura °C	●	●	●	●
CO ₂	●	●	●	●
pH	●	●	●	●
Alcalinidad	●	●		
Amonio	●	●		
Nitrito	●	●		
Nitrógeno amoniacal total (TAN)	●	●		
Nitrato	●	●		
Salinidad		●		
Aluminio	●	●		
Sólidos suspendidos totales	●	●	●	●
Flujo de agua y tasa de cambio	●	●	●	●
Productivos				
Densidad de carga (kg/m ³)	●	●	●	●
Mortalidad (%)	●	●	●	●

Tabla 4: Indicadores Operacionales (IOBs) Directos medidos por las pisciculturas encuestadas, de acuerdo al sistema de producción (RAS, FTS).

IOBs Directos	Sistema de Producción de smolt	
	RAS	FTS
Nivel Individual		
Estado de esmoltification	●	●
Factor de condición	●	●
Daño ojos	●	●
Daño boca	●	●
Daño opercular	●	●
Daño aleta caudal	●	●
Daño aleta dorsal	●	●
Daño aletas pectorales	●	●
Daño aleta pélvicas	●	●
Anormalidades	●	●
Pérdida de escamas	●	●
Efectos adversos por vacunas	●	●
Nivel Grupal		
<i>Saprolegnia</i>	●	●
<i>Flavobacterias</i>	●	●
Comportamiento	●	●

A nivel grupal, los tres indicadores se evaluaron directamente en los estanques mediante monitoreo visual. Todos los piscicultores indicaron que el comportamiento de los peces y la alimentación diaria son monitoreados rutinariamente por su propio personal, capacitado, con experiencia en las operaciones de la piscicultura. La primera alimentación fue identificada como el problema más crítico, principalmente para los alevines de salmón del Atlántico. Estos peces son alimentados bajo un régimen de saciedad, con micro-rationes suministradas durante 24 horas, lo que favorece la acumulación de restos de alimento depositados en el fondo de los estanques. Esta condición incrementa el riesgo de problemas branquiales e infecciones por *Saprolegnia* y *Flavobacteria*, patologías reportadas como las más recurrentes en la etapa de alevinaje. Durante esta etapa hasta el periodo pre-smolt, los peces permanecen bajo un fotoperiodo de 24 horas luz y reciben alimento las 24 horas, en tanto que aquellos peces sometidos a fotoperiodo invernal son alimentados únicamente durante las horas luz. De acuerdo a lo declarado por los piscicultores, el salmón coho y la trucha arcoíris son expuestos a luz artificial durante las 24 horas y a un régimen invernal de 8 horas luz y 16 horas oscuridad para activar su adaptación al mar, en tanto que el salmón del Atlántico es sometido a una amplia gama de estrategias de régimen invernal para inducir la esmoltificación, siendo las más prevalentes un régimen invernal de 8 horas luz y 16 horas oscuridad, seguida de 12 horas luz y 12 horas oscuridad (Tabla 6), lo que da cuenta de que no existe una estandarización del fotoperíodo aplicado a este proceso dentro de la industria.

Tabla 5: Anormalidades declaradas para la etapa parr-smolt de acuerdo a la especie salmonídea (n=41 pisciculturas).

Anormalidades	Salmón del Atlántico	Salmón coho	Trucha arcoíris
Lordosis - escoliosis	2	2	1
Deformidad opercular	25	6	5
Compresión vertebral caudal	15	10	4
Deformidad mandibular	14	4	1
Nefrocalcinosis	10	2	1

Tabla 6: Régimen de fotoperiodo reportado para salmón del Atlántico en agua dulce (n=24 pisciculturas).

N	Verano	Invierno
8	24:0	8:16
6	24:0	12:12
5	24:0	10:14
3	24:4	6:18

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados del estudio permitieron identificar condiciones críticas para el bienestar de los peces en agua dulce, tanto en pisciculturas de flujo abierto como en pisciculturas de recirculación, para las tres especies de salmonídeos cultivadas en Chile (salmón del Atlántico, salmón coho y trucha arcoíris).

La calidad del agua se identificó como el factor más crítico para la producción de smolts. Las pisciculturas de flujo abierto (FTS), que se abastecen principalmente con agua de ríos, presentaron un riesgo relativamente menor en comparación con las pisciculturas con sistemas RAS, que se abastecen principalmente de aguas subterráneas. El principal problema observado en pisciculturas con flujo abierto (FTS) fue la fluctuación de la temperatura del agua, estrechamente asociada a las variaciones ambientales diarias, especialmente durante el verano. En contraste, el mayor riesgo en pisciculturas con sistemas RAS fue el deterioro de la calidad del agua debido a la acumulación de metabolitos como amoníaco y dióxido de carbono (CO₂), consecuencia inherente al reúso del agua. Este fenómeno puede comprometer seriamente el bienestar de los peces (Hjeltne y col. 2012). Adicionalmente, las pisciculturas RAS deben mantener un estricto control de las concentraciones de aluminio e hierro, dado que niveles elevados pueden provocar mortalidad en alevines, altamente susceptibles a estos minerales (Davison y col. 2009, Kristensen y col. 2009).

Otro de los problemas importantes identificados en este estudio, fue la maduración precoz en machos de salmón del Atlántico, observada principalmente en pisciculturas que utilizan recirculación (RAS). La literatura señala que el uso de fotoperiodo artificial y el aumento de la temperatura del agua por encima de los rangos óptimos, practicas destinadas a estimular el crecimiento de los peces, son factores determinantes en la inducción de madurez temprana (Fjellidal y col. 2011, Good & Davidson 2016, Good y col. 2016).

La mortalidad clasificada como no-infecciosa también se identificó como un factor crítico durante la etapa parr-smolt. Este tipo de mortalidad incluye la eliminación de peces anormales o con bajo potencial de crecimiento, considerados no aptos para la producción comercial. Según datos de Sernapesca (2024), en 2023 la mortalidad clasificada como no-infecciosa en agua dulce, correspondió al 87,5% de la mortalidad total en salmón del Atlántico, 93% en salmón coho y 80,3% en trucha arcoíris, cifras considerablemente superiores a la mortalidad causada por enfermedades infecciosas, que no superó el 20% del total. Estos valores evidencian condiciones de bienestar subóptimas durante la fase de cultivo en agua dulce. A la fecha, en Chile no se cuenta con regulaciones específicas sobre bienestar de peces. Sin embargo, las empresas que participaron en el estudio declararon haber desarrollado protocolos propios para evaluar el bienestar de los peces en las diferentes etapas del ciclo productivo. Esto permitió validar los indicadores operacionales de bienestar utilizados en este estudio, basados en los IOBs propuestos por Noble y col. (2018).

Si bien el 83,3% de los piscicultores encuestados indicó contar con formación en bienestar animal y el 60% señaló disponer de un profesional dedicado exclusivamente a esta área, persiste la necesidad de avanzar hacia protocolos estandarizados que permitan mejorar la evaluación y gestión del bienestar de los salmónidos cultivados en agua dulce.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Davidson J., Good C., Welsh C., Brazil B., Summerfelt S. 2009. Heavy metal and waste metabolite accumulation and their potential effect on rainbow trout performance in a replicated water reuse system operated at low or high system flushing rates. *Aquaculture Engineering*, 41: 136-145.
- Fjellidal P. G., Hansen T., Huang T.S. 2011. Continuous light and elevated temperature can trigger maturation both during and immediately after smoltification in male Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 321: 93-100.
- Good C., Davidson J. 2016. A review of factors influencing maturation of Atlantic salmon, *Salmo salar*, with focus on water recirculation aquaculture system environments. *Journal of World Aquaculture Society*. Vol.47. 5: 605-632.
- Good C., Weber G. M., May T, Davidson J., Summerfelt S. 2016. Reduced photoperiod (18 h light vs. 24 h light) during first-year rearing associated with increased early male maturation in Atlantic salmon *Salmo salar* cultured in a freshwater recirculation aquaculture system. *Aquaculture Research*. 47: 3023-3027.
- Hjeltnes B., Bæverfjord G., Erikson U., Mortensen S., Rosten T., Østergård P. 2012. Risk Assessment of Recirculation Systems in Salmonid Hatcheries. Norwegian Scientific Committee for Food Safety (VKM). Doc.no 09-808-Final.
- Khaw H.L., Gjerde B., Boison S.A., Hjelle E., Difford G.F. .2021. Quantitative genetics of smoltification status at the time of seawater transfer in Atlantic Salmon (*Salmo Salar*). *Front. Genet.* 12:696893.
- Kristensen T., A°tland A°, Rosten T., Urke H.A., Rosseland B.O. 2009. Important influent-water quality parameters at freshwater production sites in two salmon producing countries. *Aquacultural Engineering*, 41: 53-59
- Midtlyng P. J., Reitan L. J., Speilberg L. 1996. Experimental studies on the efficacy and side-effects of intraperitoneal vaccination of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) against furunculosis. *Fish & Shellfish Immunology* 6, 335-350.
- Noble C., Gismervik K., Iversen M.H., Kolaveric J., Nilsson J., Stien L.H., Turnbull J.F. 2018. Welfare indicators for farmed Atlantic salmon: tools for assessing fish welfare. 351 pp.
- Proyecto FIPA 2017-29. 2019. Determinación y aplicación de indicadores operacionales de bienestar animal en salmónidos cultivados en agua dulce. https://www.subpesca.cl/fipa/613/articles-108119_archivo_01.pdf
- SERNAPESCA. 2012. Resolución Exenta 1468. <https://www.sernapesca.cl/normativas/resex-ndeg1468-2012-programa-sanitario-general-de-mortalidades-2012-06-28/>
- SERNAPESCA. 2024. Informe con antecedentes sanitarios de agua dulce y mar. <https://www.sernapesca.cl/app/uploads/2024/09/Informe-Sanitario-ANO-2023.pdf>
- RSPCA. 2018a. RSPCA welfare standards for farmed Atlantic salmon. <https://science.rspca.org.uk/sciencegroup/farmanimals/standards/salmon>
- RSPCA. 2018b. RSPCA welfare standards for farmed rainbow trout. <https://science.rspca.org.uk/sciencegroup/farmanimals/standards/trout>
- Schreck C.B., Contreras-Sanchez W., Fitzpatrick M.S. 2001. Effects of stress on fish reproduction, gamete quality, and progeny. *Aquaculture* 197, 3-24.
- Wagner E., Arndt R., Hilton B. 2002. Physiological stress responses, egg survival and sperm motility for rainbow trout broodstock anesthetized with clove oil, tricaine methanesulfonate or carbon dioxide. *Aquaculture* 211, 353-366.



SALMON MAGALLANICO NAVEGANDO HACIA LA SOSTENIBILIDAD

En el último tiempo la industria salmonera de la Región de Magallanes ha dado fuertes pasos hacia la sustentabilidad. Su clasificación en el estudio Seafood Watch de una prestigiosa ONG norteamericana y otras certificaciones nacionales e internacionales que dan cuenta de un menor uso de antibióticos, entre otras variables, son parte de la evidencia científica que lo respalda. Avanzar en esa ruta junto con un mejor involucramiento en los desafíos de desarrollo regional ha sido parte de la estrategia de trabajo de la Asociación de Salmonicultores de Magallanes durante los últimos años.



"Somos conscientes de la responsabilidad que tenemos no sólo en dar trabajo, sino también del aporte que realizamos. Estamos muy orgullosos de generar empleo, pero nuestro compromiso de largo plazo no solo es económico, es social y medioambiental".

La Asociación de Salmonicultores de Magallanes representa a cinco empresas que operan en la región: MultiX, AquaChile, Australis, Cermaq y Blumar, que están ubicadas en las comunas de Punta Arenas, Puerto Natales, Río Verde y Porvenir. La industria salmonera tiene un fuerte impacto en la economía de la zona austral de Chile; el sector reúne a más de 4.400 trabajadores directos y el 85% de ellos son residentes de Magallanes.



La importancia del estudio de la sangre en las infecciones por *Piscine orthoreovirus*

PHARMAQ
Analytiq

Claudio Arcos ¹, Constanza Imilqueo ¹, Geraldine Wittwer ¹

¹ PHARMAQ Analytiq Chile, Puerto Montt, Chile

ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

La presencia de *Piscine orthoreovirus* (PRV) en la acuicultura de salmónidos ha adquirido gran relevancia debido a su asociación con enfermedades emergentes, tales como la inflamación del corazón y los músculos esqueléticos (HSMI) y el síndrome icterico del salmón Coho (SIC). Diversos estudios han demostrado que el agente viral PRV tiene un tropismo específico por los eritrocitos, lo que sugiere que éstos juegan un rol crucial en la infección viral. En un estudio, se observó que más del 50% de los eritrocitos de algunos peces infectados eran positivos para PRV, indicando que la replicación del virus en los eritrocitos podría ser un factor crítico en la patogénesis de las enfermedades asociadas a PRV (figura 1) (Finstad et al., 2014). Wessel et al. (2015) proporciona un modelo ex vivo que demuestra la replicación del PRV en eritrocitos de salmón atlántico, permitiendo estudiar los mecanismos de infección y la respuesta inmune antiviral de los eritrocitos. Este modelo es fundamental para entender cómo el PRV provoca enfermedades en los salmones y cómo se puede gestionar su propagación en la acuicultura.

Recientes investigaciones realizadas en Chile han identificado que tanto las variantes PRV-1b como PRV-3a están presentes en Salmón Coho que han desarrollado el síndrome icterico, lo que resalta la necesidad de vigilancia continua en los cultivos de salmón para mitigar el impacto económico y sanitario de estas infecciones (Cartagena et al., 2020). La correlación entre la carga viral en la sangre y la aparición de síntomas clínicos como anemia e ictericia ha sido documentada, sugiriendo que la presencia del virus en la circulación sanguínea puede tener consecuencias significativas para la salud de los peces. Rozas Serri et al. (2025) muestra que las infecciones por PRV-1b y PRV-3a en Salmón Coho están asociadas con cambios patológicos en el corazón y el hígado, así como alteraciones hematológicas que reflejan un estado de anemia hemolítica. Estos hallazgos subrayan la importancia de investigar la dinámica del PRV en la sangre y su relación con los síntomas clínicos y la fisiopatología de las enfermedades en salmones.

En resumen, la detección y estudio de infecciones por PRV en la sangre de salmones son esenciales para comprender la

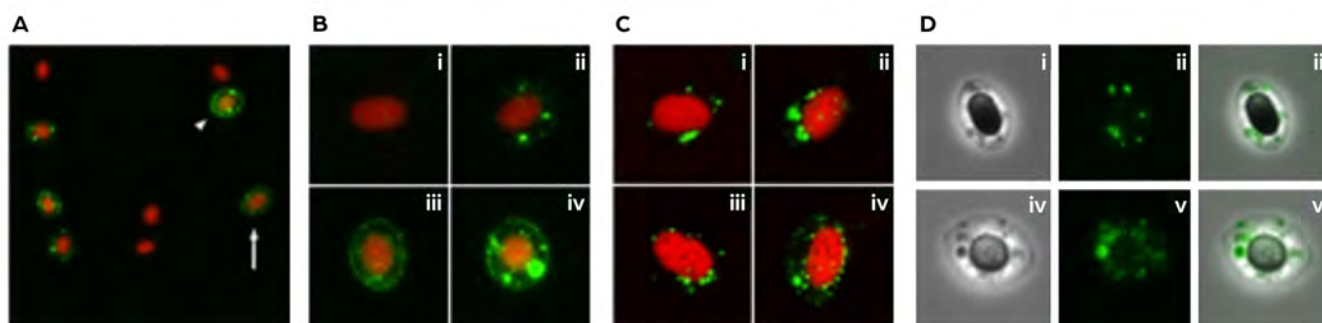


Figura 1: Inmunofluorescencia y microscopía confocal de eritrocitos infectados con PRV. Fluorescencia de la proteína 61 de PRV en eritrocitos (verde). Núcleo de células teñidas con yoduro de propideo (rojo). (A) Eritrocito positivo a PRV detectado mediante microscopía de inmunofluorescencia (IF). Las células teñidas variaban en morfología, desde glóbulos rojos maduros alargados (flecha) hasta células más esféricas que se parecerían a eritrocitos inmaduros (punta de flecha). (B) Microscopía de IF con una célula negativa (i) y diferentes patrones de tinción en el citoplasma incluyendo algunas pequeñas inclusiones (ii), tinciones granulares dispersas (iii) y amplias inclusiones citoplasmáticas (iv). (C) Imágenes de microscopio confocal mostrando cuerpos de inclusión en la región perinuclear (i-iii) y patrones de tinción más dispersos (iv). En fase de contraste se observan cuerpos de inclusión en el citoplasma (i, iv) y microscopía IF (ii, v), y con localizado por superposición de imágenes (iii, vi).

epidemiología y la patogénesis de las enfermedades virales en la acuicultura. En concreto, una estrategia de investigación permanente ayuda a desarrollar estrategias efectivas de control y prevención de estas infecciones que amenazan la salud de los peces y la sostenibilidad de la industria acuícola.

DESARROLLOS EN PHARMAQ ANALYTIQ

A partir del año 2018 comenzó en PHARMAQ Analytiq el desarrollo de un programa para realizar un adecuado seguimiento del Síndrome Ictérico del Salmón Coho, una enfermedad que afecta esta especie por más de dos décadas. El programa considera el análisis de biología molecular para el diagnóstico de *Piscine orthoreovirus* mediante RT-PCR, análisis de sangre para caracterizar el hemograma y la identificación de cuerpos de inclusión, perfil bioquímico con análisis de enzimas específicas y finalmente histología de órganos diana que regularmente suelen ser afectados por esta enfermedad. Al correr de los años y con múltiples seguimientos realizados, ha sido posible confirmar que el estudio de la sangre es clave para el entendimiento de la enfermedad. Con un buen plan en terreno e información de laboratorio es posible proyectar y anticiparse a la aparición del brote, determinar el nivel de daño y poder establecer un pronóstico de la población en estudio.

La hematología es el punto de partida para el estudio de esta enfermedad. La adecuada y precisa caracterización de las células sanguíneas permite establecer ciertos patrones claves para una mejor comprensión de esta infección.

Para este estudio, se aplicaron observaciones del tipo observación microscópica directa, conteos en cámara y además la innovadora técnica de hematología digital desarrollada por PHARMAQ Analytiq. Desde 2024, en PHARMAQ Analytiq Chile se desarrolla un proyecto pionero dedicado al entrenamiento del software VETSCAN IMAGYST® para la identificación de células sanguíneas en peces salmonídeos. Dado que los glóbulos rojos en peces presentan núcleo, a diferencia de los mamíferos, el desafío tecnológico es considerable. El sistema no solo permite el recuento automatizado de células, sino que también distingue con precisión hasta 33 clases diferentes de elementos figurados sanguíneos, incluyendo 10 morfologías de glóbulos rojos, 9 formas y fases de leucocitos, y 6 configuraciones de trombocitos. Esta capacidad de diferenciación avanzada representa un hito en la hematología veterinaria de especies acuícolas. Esta tecnología elimina el sesgo del operador, agiliza los resultados y facilita la hematología en zonas remotas, ya que un frotis sanguíneo correctamente tomado en terreno basta para una lectura precisa con VETSCAN IMAGYST®, superando la necesidad de transportar muestras frescas largas distancias al laboratorio.

ELEMENTOS DE ESTUDIO

Los parámetros sanguíneos que consideramos esenciales para predecir y comprender la evolución clínica de una población incluyen: volumen glomerular acumulado (VGA) o hematocrito, recuento absoluto (células/ μ l), número de eritrocitos (RGR), linfocitos, heterófilos, trombocitos y, de manera especial, la diferenciación y el conteo de cuerpos de inclusión intracitoplasmáticos (CI) en eritrocitos, así como la identificación de glóbulos rojos inmaduros (EI). Los resultados de los parámetros antes indicados acompañados de estudios de biología molecular como el RT-PCR PRV y la Histología de corazón, músculo e hígado robustecen aún más el análisis de la enfermedad. Esta combinación de sistemáticas observaciones y su interpretación multidisciplinaria facilita la toma de decisiones oportunas y la implementación de medidas de control efectivas, con el objetivo de minimizar el impacto de este cuadro en la producción de Salmón Coho.

A lo largo de la evolución de la enfermedad, se observa una secuencia definida de alteraciones hematológicas y virológicas. Inicialmente, se detecta un incremento en la presencia de cuerpos de inclusión intracitoplasmáticos (CI) en los eritrocitos, junto con el surgimiento de eritrocitos inmaduros (EI) en el examen morfológico hemático. Con el progreso del cuadro, los cuerpos de inclusión tienden a desaparecer mientras persiste una cantidad incrementada de eritrocitos inmaduros. Paralelamente, el análisis mediante RT-PCR para el virus PRV revela una disminución en los valores de Ct, lo que se traduce en una mayor carga viral detectada en las muestras (ver Figura 2). Este patrón es concomitante con la reducción progresiva de los valores de VGA. Posteriormente, se registra una dispersión en el recuento total de linfocitos, asociado a la presencia de linfocitos reactivos, reflejando una respuesta adaptativa al estímulo viral. De forma secuencial, los valores de heterófilos muestran una tendencia ascendente, acompañados de signos morfológicos de toxicidad. Los trombocitos, por su parte, evidencian un incremento en su concentración sanguínea coincidente con la fase aguda del proceso infeccioso. Finalmente, la evaluación histopatológica de los tejidos diana confirma infiltrados inflamatorios caracterizados por predominio de linfocitos. La magnitud y distribución de estos hallazgos histológicos permiten establecer una correlación directa con el pronóstico clínico de la enfermedad, facilitando una estratificación más precisa de la población afectada.

Para validar la hipótesis propuesta sobre el comportamiento temporal de la enfermedad, se procedió a evaluar la fuerza y dirección de las correlaciones existentes entre los principales parámetros hematológicos y virológicos. En la revisión más reciente, se trabajó con una base de datos compuesta por aproximadamente 1.000 registros obtenidos entre los años 2024 y 2025.

El análisis se centró en determinar las correlaciones entre cuerpos de inclusión intracitoplasmáticos (CI), eritrocitos inmaduros (EI) y los valores de Ct para PRV1 y PRV3, así como la relación entre Ct de PRV1/PRV3 y los valores VGA. En el primer análisis de correlación, se observó que los valores de Ct obtenidos por RT-PCR para PRV1

y PRV3 presentan una asociación negativa robusta con el recuento de eritrocitos inmaduros (betas $\sim -2,54$ y $-2,41$; $p < 0,001$), lo que indica que una mayor cantidad de eritrocitos inmaduros se correlaciona con valores de Ct más bajos, reflejando una mayor carga viral (ver Figura 3). En el segundo análisis, los valores de VGA se correlacionan positivamente con los Ct de PRV1 y PRV3 ($r \sim 0,284$ y $r \sim 0,366$; $p = 0,001$), sugiriendo que un mayor Ct (menor carga viral de PRV) se asocia con valores elevados de VGA (ver Figura 4).

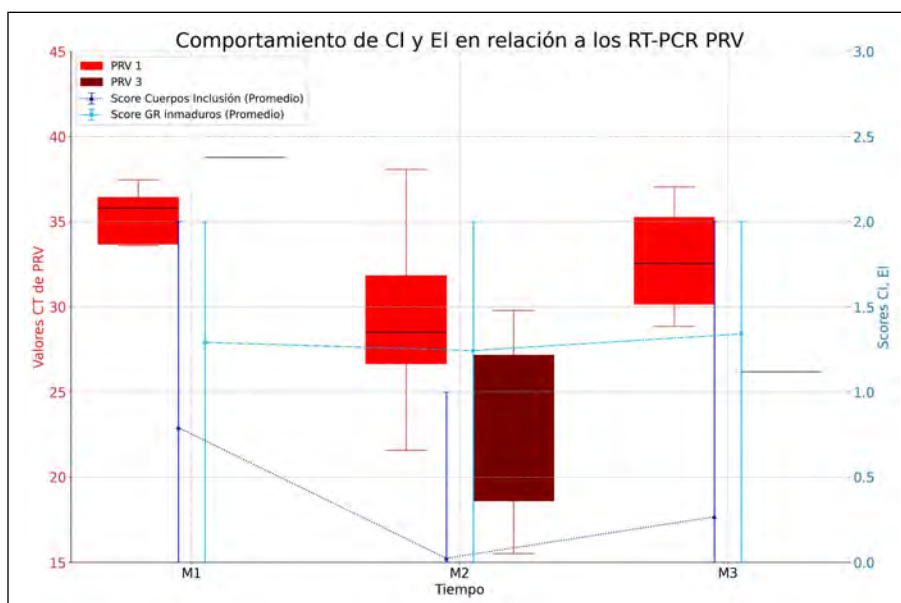


Figura 2: Muestra el comportamiento de los cuerpos de inclusión y eritrocitos inmaduros con relación a los valores de Ct de PRV1 y PRV3.

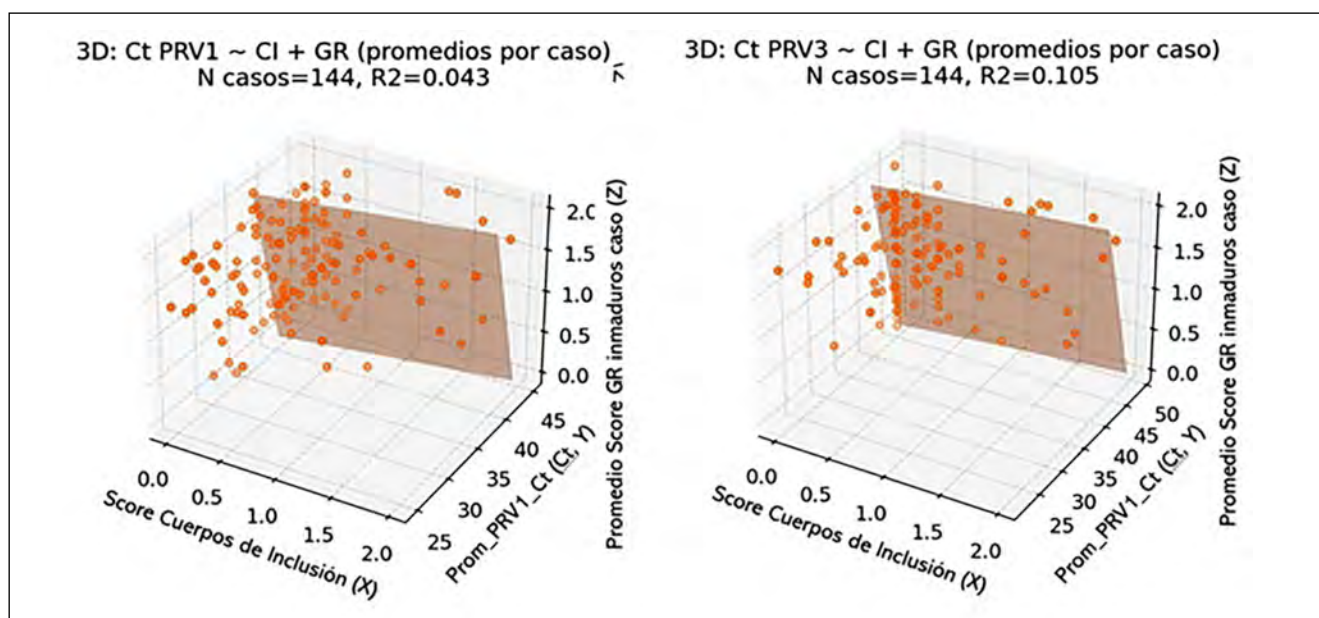


Figura 3: Representa un análisis de correlación tridimensional realizado para evaluar las asociaciones entre la presencia de cuerpos de inclusión intracitoplasmáticos (CI), el valor de Ct del RT-PCR para PRV1 o PRV3, y la proporción de glóbulos rojos inmaduros (EI) por caso. En el gráfico, el eje X corresponde al promedio de puntaje de cuerpos de inclusión por caso, el eje Y representa el valor de Ct para PRV1 o PRV3 y el eje Z muestra el promedio de puntaje de glóbulos rojos inmaduros por caso. El análisis incluye el total de muestras obtenidas de peces provenientes tanto de ambientes de agua dulce como de agua de mar, otorgando representatividad a distintas etapas de manejo y condiciones ambientales. Los resultados evidencian una asociación negativa robusta entre el Ct de PRV y el promedio de glóbulos rojos inmaduros (EI) a nivel de caso. Se observa que, a mayor cantidad de GR inmaduros, el valor de Ct disminuye, lo que indica una mayor carga viral. Este efecto es estadísticamente significativo y presenta una magnitud relevante en el contexto de la dinámica de infección viral. Para normalizar los datos y permitir una inclusión adecuada de casos negativos para PRV, se asignó un valor de Ct igual a 45 a aquellas muestras en las que la RT-PCR fue negativa. Adicionalmente, el gráfico incorpora un cuadro naranja oscuro translúcido, el cual delimita las regiones donde se concentra la correlación significativa entre las variables analizadas. Esta representación gráfica permite visualizar claramente el patrón de asociación y contribuye a la interpretación integrada de los datos hematológicos y virológicos, fortaleciendo la evidencia científica respecto a la interacción entre respuesta eritrocitaria inmadura y carga de PRV en la población evaluada.

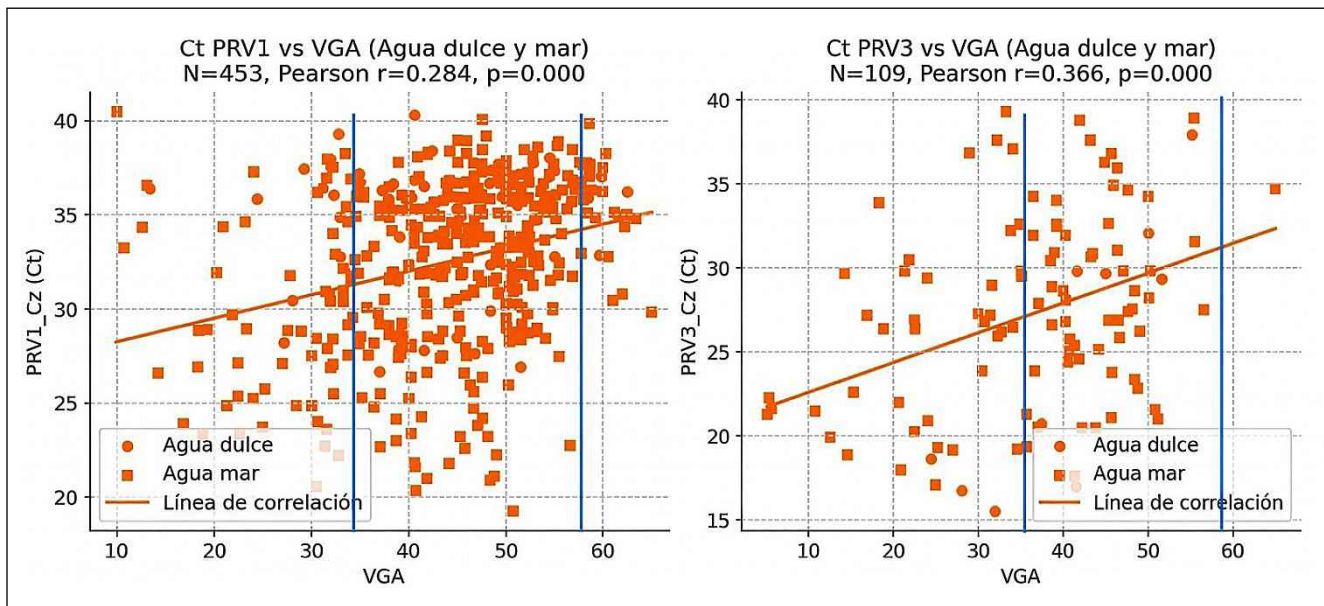


Figura 4: Presenta el análisis de correlación entre los valores de Ct de PRV1 y PRV3 y el VGA, incluyendo todas las muestras provenientes de los distintos procesos de muestreo, tanto en ambientes de agua dulce como de agua de mar. Para la evaluación de la relación entre estos parámetros se aplicaron pruebas estadísticas de correlación lineal de Pearson y de rango de Spearman, permitiendo determinar la fuerza y dirección de la asociación entre los valores de Ct y VGA. En la representación gráfica, los círculos corresponden a los valores de Ct obtenidos de muestras de agua dulce y los cuadrados representan muestras de agua de mar. El eje X exhibe los valores de VGA, mientras que el eje Y muestra los valores de Ct para PRV1 o PRV3. La línea azul indica el rango considerado normal para VGA en peces adultos, específicamente en *O. kisutch*, con valores que oscilan entre 35% y 68%. La línea naranja representa la línea de correlación obtenida de los datos procesados. Es importante destacar que únicamente se incluyeron en el análisis aquellas muestras que presentaron valores de Ct detectables, asegurando la precisión del cálculo correlacional. Esta aproximación metodológica permite evaluar y visualizar la relación cuantitativa entre la carga viral estimada (reflejada en el Ct) y la condición hematológica de los individuos (estimada mediante el VGA), aportando evidencia sobre la dinámica viral en función del estado fisiológico sanguíneo en salmonídeos.

CONCLUSIONES

El estudio integral de parámetros sanguíneos en infecciones por *Piscine orthoreovirus* (PRV) en salmonídeos permite caracterizar de forma objetiva la dinámica clínica y fisiopatológica de los cuadros asociados. El análisis hematológico revela una secuencia definida de alteraciones celulares —como el aumento inicial de cuerpos de inclusión intracitoplasmáticos y eritrocitos inmaduros, reducción progresiva del volumen glomerular acumulado y cambios en la distribución de leucocitos y trombocitos— que, junto al elevado poder de discriminación del hemograma digital automatizado mediante VETSCAN IMAGYST®, facilitan la detección temprana de la infección y la evaluación del estado clínico en poblaciones afectadas.

Las correlaciones estadísticas robustas entre recuento de eritrocitos inmaduros y carga viral, así como la relación directa entre el valor de Ct y parámetros hematológicos, demuestran que la sangre constituye una matriz fundamental para el monitoreo y pronóstico de las infecciones por PRV. Este enfoque permite una estratificación más precisa del riesgo y una mejor predicción del desenlace clínico en peces infectados.

El desarrollo e implementación de tecnologías como la hematología digital avanzada (VETSCAN IMAGYST®) y la automatización en la identificación celular, aplicadas en el contexto productivo, no solo garantizan resultados fiables y reproducibles, sino que también aseguran la viabilidad de sistemas diagnósticos en zonas remotas, superando barreras logísticas y de especialización. La integración de datos hematológicos, virológicos y anatomopatológicos sustenta un modelo predictivo robusto, orientado tanto a la vigilancia epidemiológica como a la toma de decisiones sanitarias en la industria acuícola.

En conclusión, el estudio sistemático de la sangre mediante tecnologías innovadoras contribuye de manera decisiva a la comprensión, control y prevención de los impactos sanitarios y productivos asociados a la infección por PRV en salmonídeos, consolidando su relevancia como herramienta fundamental en la gestión sanitaria de la acuicultura moderna.

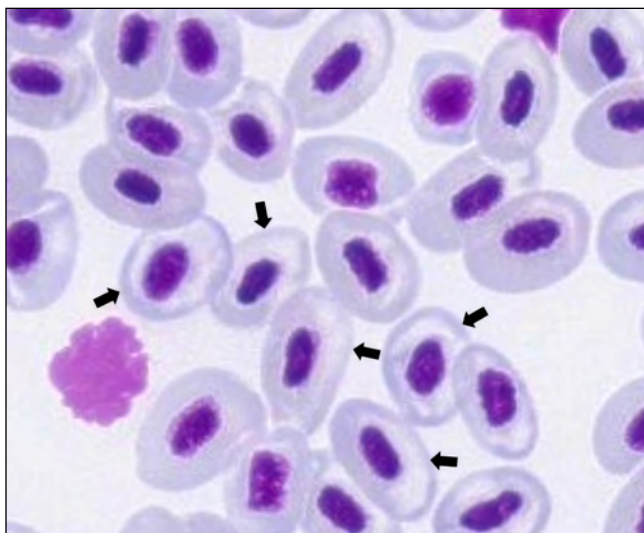


Figura 5: 100x. Eritrocitos inmaduros (flechas). VETSCAN IMAGYST®

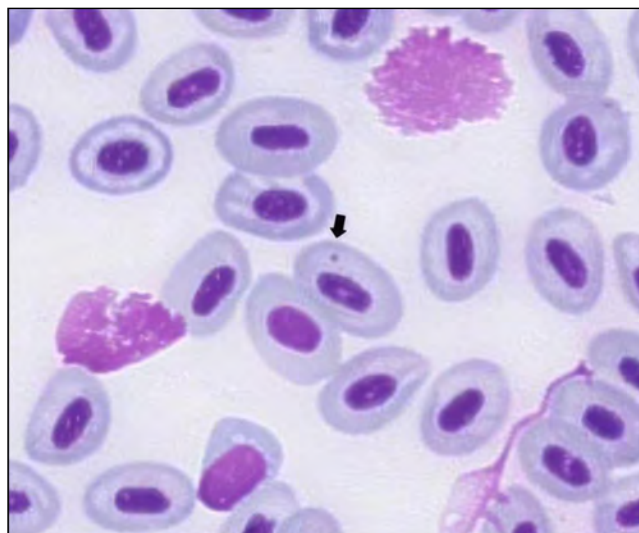


Figura 6: 90x. Eritrocito con un cuerpo de inclusión (cuadrado) y eritrocitos en hemólisis. VETSCAN IMAGYST®

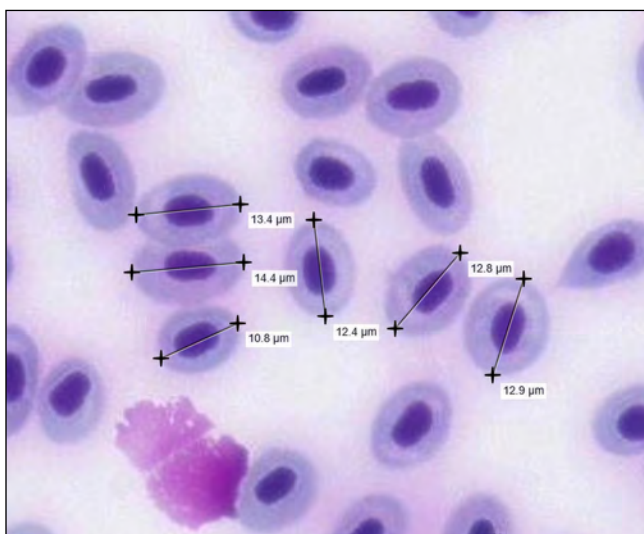


Figura 7: 100x. Medición de eritrocitos con microcitosis. VETSCAN IMAGYST®

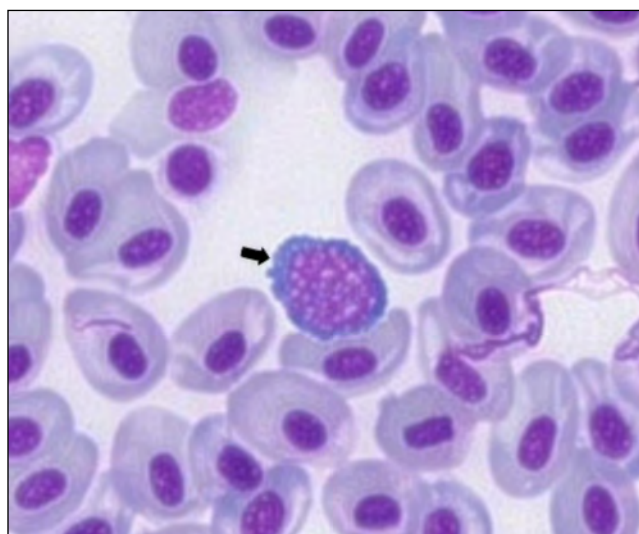


Figura 8: 100x. Linfocito reactivo (flecha negra). VETSCAN IMAGYST®

Imágenes obtenidas con VETSCAN IMAGYST®

REFERENCIAS

Finstad, W. et al. (2014). *Piscine orthoreovirus* (PRV) infects Atlantic salmon erythrocytes. *Veterinary Research*, 45:35.

Cartagena, J. et al. (2020). Detection of *Piscine orthoreoviruses* (PRV-1b AND PRV-3a) in farmed Coho salmon with jaundice syndrome from Chile. *Aquaculture*.

Rozas Serri, M. et al. (2025). PRV 1b and PRV 3a infection is associated with the same clinical disease in coho salmon. *Veterinary Research*, 56:17.

Wessel, Y. et al. (2015). PRV replicates in Atlantic salmon erythrocytes ex vivo. *Veterinary Research*, 46:26.

Zoetis Inc. (2024). VETSCAN IMAGYST® Hematology System. [Product Information and Technical Documentation]. Zoetis Global.



- **Fundas - Láminas**
- **Bolsas net-bag para redes**
- **Insumos para selladoras**
- **Cintas de canalización**
- **Mangas polietileno e Invernadero**
- **Rollos prepicado**
- **Mallas raschel**
- **Bolsas basura**
- **Malla faenera**
- **Bolsas vacío**
- **Bolsas bins**



Estamos certificados con la norma BRCGS Packaging Materials

FONOS 65 228 6420 65 228 6416 +569 5411 9904

PARCELA 22 ALTO LA PALOMA PUERTO MONTT

MARCELA.CARDENAS@PLASTICOSAUSTRAL.CL WWW.PLASTICOSAUSTRAL.CL

Estructura y cinética de expresión de *sdhA* de *Piscirickettsia salmonis* durante una infección de células similares a macrófagos de salmón del atlántico



UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

Marcos Cortés¹, Kevin Maisey², Mónica Imarai³

¹ Núcleo de Ciencias Biológicas, Universidad Mayor, Temuco, Chile. marcos.cortes@umayor.cl

² Laboratorio de Inmunología Comparativa, Centro de Biotecnología Acuicola, Facultad de Química y Biología. Universidad de Santiago de Chile. kevin.maisey@usach.cl

³ Laboratorio de Inmunología, Departamento de Biología, Centro de Biotecnología Acuicola, Facultad de Química y Biología. Universidad de Santiago de Chile. monica.imarai@usach.cl

El síndrome rickettsial del salmón (SRS) o piscirickettsiosis es una enfermedad infecciosa de los peces responsable de altas pérdidas económicas en la industria salmonicultura chilena. El agente etiológico de la enfermedad es *Piscirickettsia salmonis*, bacteria pleomórfica intracelular facultativa, Gram negativa, de forma predominantemente cocoide, agrupada en pares, con un diámetro que varía entre 0,5 y 1,5 μm . Basándose en la secuenciación del gen 16S rRNA, *P. salmonis* se ubicó en la familia Piscirickettsiaceae dentro de la clase Gammaproteobacteria, más estrechamente relacionada con *Coxiella*, *Francisella* y *Legionella* (Rozas & Enriquez, 2014). Durante la infección en células tipo macrófagos de salmónidos, *P. salmonis* evaden la fusión del fagolisosoma, reducen la acidificación lisosomal y la actividad proteolítica en las células huésped durante la primera hora post-infección (Perez-Stuardo et al., 2019). Esta bacteria sobrevive y prolifera en una vacuola auto-inducida por sobre diez días post-infección (McCarthy et al., 2008).

Hasta la fecha, los factores de virulencia y los mecanismos implicados en el establecimiento de la infección en peces siguen siendo poco conocidos. Los factores de virulencia son moléculas o estructuras generadas por microorganismos que les permiten colonizar e invadir al organismo que infectan y además evitar sus defensas, es decir son mecanismos que le permiten al patógeno causar la enfermedad (Green & Mecsas, 2016). En *P. salmonis*, existe evidencia que ha permitido establecer esta bacteria posee un sistema de secreción Dot/Icm tipo IVB (T4BSS) que forma parte de los factores de virulencia y es un complejo proteico que permite inyectar proteínas efectoras desde la bacteria al citoplasma de células infectadas (Cortes et al., 2017; Gomez et al., 2013). Un número importante de genes codifican a las proteínas de este sistema como *dotH*, *dotG*, *dotF*, *dotE*, *dotD*, *dotC*, *dotB*, *icmT*, *dotL*, *dotM*, *dotN*, *icmW*, *dotO*, *dotA*, *dotI*, *icmV*, *icmK*, *icmB* e *icmE*. Algunos de estos genes se sobre-expresan durante la infección por *P. salmonis*, lo que sugiere un papel relevante como factores de virulencia que le permitiría manipular procesos

celulares, evadir el sistema inmune y establecer su nicho intracelular para su supervivencia y replicación.

Los estudios sobre otros factores de virulencia de *P. salmonis* son escasos. Sin embargo, se puede plantear la hipótesis de que los presentes en una bacteria filogenéticamente relacionada, como *Legionella pneumophila*, que en humanos causa una neumonía grave denominada la enfermedad del legionario, también podrían estar presentes en *P. salmonis*. Un factor clave en este sentido es SdhA, una proteína que participa en el mantenimiento de la integridad de la membrana vacuolar donde el patógeno se replica. En ratones, la expresión de *sdhA* parece esencial para la virulencia, ya que una cepa mutante carente de SdhA provoca la desestabilización de la vesícula citoplasmática, la liberación de la bacteria al citoplasma y la alteración del crecimiento intracelular de la bacteria en los macrófagos murinos. En *L. pneumophila*, SdhA es un sustrato translocado por Icm/Dot y se une a la inositol polifosfato 5-fosfatasa OCRL, que regula la dinámica de los compartimentos endosomales. Esta unión bloquea la acción de OCRL y mejora la integridad de la vesícula inducida por patógenos (Choi et al., 2021).

Para estudiar SdhA como potencial factor de virulencia en *Piscirickettsia salmonis*, realizamos primero alineamientos de múltiples secuencias nucleotídicas de *sdhA* de *P. salmonis* (LF-89 y AUS005), *Legionella pneumophila*, *Coxiella burnetii*, *Escherichia coli* y *Rickettsia prowazekii* los que mostraron un porcentaje de similitud que osciló entre el 53 y el 66 % entre ellas. Las secuencias de aminoácidos de SdhA de *P. salmonis* (LF-89 y AUS005) y las secuencias de SdhA descritas previamente de *L. pneumophila*, *C. burnetii*, *E. coli* y *Renibacterium salmoninarum* también se analizaron mediante alineamientos múltiples. Las identidades y similitudes entre la proteína SdhA de *P. salmonis* y las de las otras bacterias fueron mayores con la SdhA de *L. pneumophila* (Figura 1) (Cortes et al., 2026). Para confirmar la existencia de la proteína SdhA en *P. salmonis*, extrajimos la proteína total de las bacterias cultivadas

en un medio líquido durante 3 a 6 días y de vesículas de membrana bacterianas. La identificación de péptidos de SdhA mediante espectrometría de masas confirmó la presencia de la proteína SdhA en las bacterias y extracelularmente en las vesículas de membrana lo que evidencia su potencial transporte desde la bacteria hacia el interior de la célula infectada.

En este estudio, también medimos la expresión transcripcional de *sdhA* en monocapas de células SHK-1 infectadas con la cepa LF-89 de *P. salmonis* durante un período de infección de 192 horas (8 días). Los resultados del análisis RT-qPCR mostraron un aumento de seis veces en las moléculas de mRNA de SdhA a las 12 h post-infección (hpi) en comparación con el valor basal sin infección

(Figura 2). Este aumento fue seguido por una disminución a las 16 hpi y un retorno a la expresión basal a las 24 hpi, que persistió hasta el final del experimento (Figura 2). Además, el análisis Western blot mostró un aumento en los niveles de proteína SdhA, alcanzando un máximo a las 24 hpi y manteniéndose estable hasta las 96 hpi, tras lo cual regresó a los niveles basales (Figura 3). El aumento sostenido de la proteína SdhA en la célula infectada entre las 24 y 96 días de infección (Figura 3) es consistente con su potencial función en la generación y mantención de la vacuola que contiene a *P. salmonis* y favorece su persistencia y proliferación en su interior.

En conjunto, la novedad de estos hallazgos radica en la identificación de SdhA de *P. salmonis* y la evidencia de su presencia durante la infección. Esta bacteria ha demostrado una capacidad excepcional para evadir su destrucción replicándose dentro de un compartimento especializado como la vacuola, por lo que identificar SdhA como un factor de virulencia responsable de este mecanismo que impide la eliminación de la bacteria lo transforma en un blanco terapéutico excepcional.

En este estudio fue también importante analizar características estructurales de la proteína SdhA de *P. salmonis*. Así examinamos la secuencia aminoacídica de la proteína para identificar motivos lineales cortos (SLiM) cuya presencia permite predecir diferentes funciones subcelulares de SdhA en las células eucariotas. Varios SLiM están presentes en SdhA, entre estos se identificaron: (i) motivos LIR como la secuencia SMTFAHVDPIKA (residuos 334-345). Estos permitirían a SdhA unirse a la familia de proteínas Atg8, componentes clave del sistema de autofagia, proceso que puede ayudar a destruir virus y bacterias; (ii) secuencias SLiM como DDWRW (residuos 63-67) desempeñan un papel en el transporte vesicular, por lo que SdhA podría influir en el tamaño y la integridad

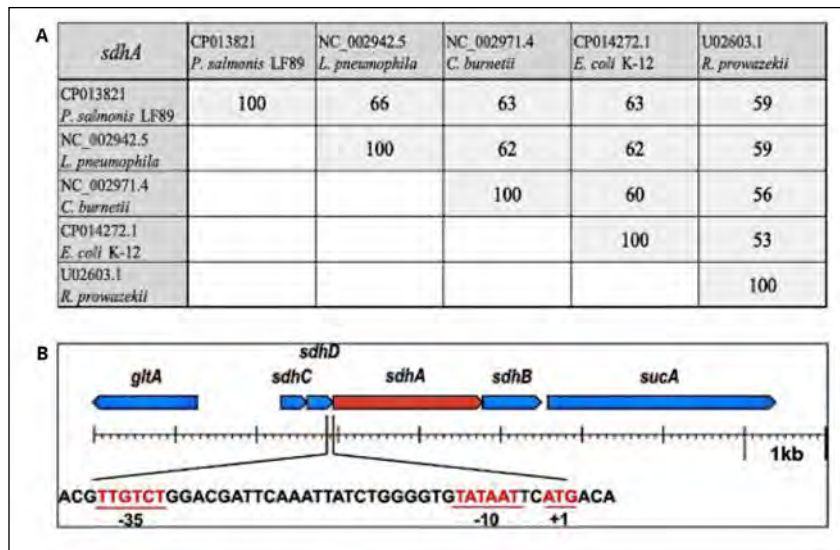


Figura 1: Análisis de la secuencia del gen *sdhA* de la cepa LF-89 de *Piscirickettsia salmonis*. A. Matriz de identidad porcentual de nucleótidos por pares entre *sdhA* de *P. salmonis* LF89 (CP013821), *L. pneumophila* subsp. *pneumophila* str. Philadelphia 1 (NC_002942.5), *C. burnetii* RSA 493 (NC_002971.4), *E. coli* K-12 (CP014272.1), *R. prowazekii* str. Madrid E (U02603.1). B. Secuencias reguladoras del gen *sdhA* río arriba de +1. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2025.110929>

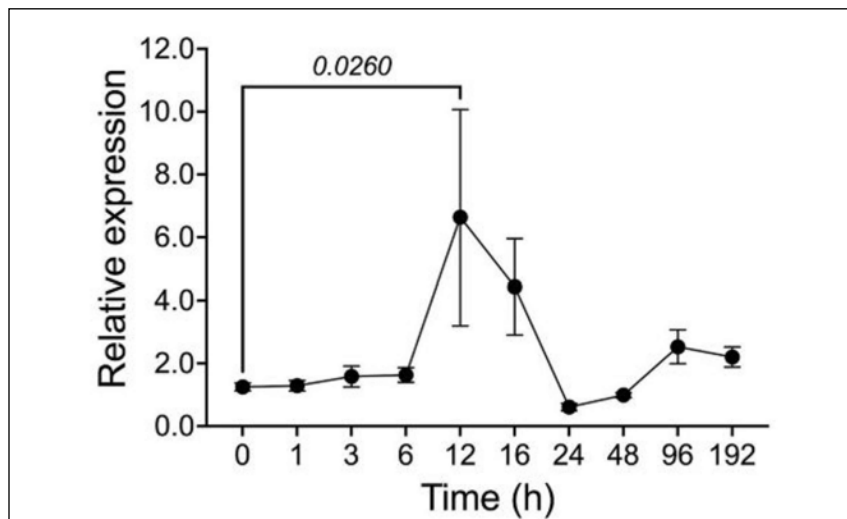


Figura 2: Cinética de la expresión transcripcional de *sdhA* en la línea celular SHK-1 infectada con *Piscirickettsia salmonis*. La infección de cultivos de la línea celular SHK-1 con la cepa *P. salmonis* LF-89 se realizó a un MOI de 10 y se siguió la expresión de *sdhA* en varios puntos temporales, según se indica, mediante RT-qPCR. Los resultados mostrados son la media y la desviación estándar de cuatro experimentos independientes. Se utilizó un ANOVA de una vía para analizar las diferencias de expresión con respecto al tiempo cero. Un valor de $p < 0,05$ se consideró estadístico. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2025.110929>

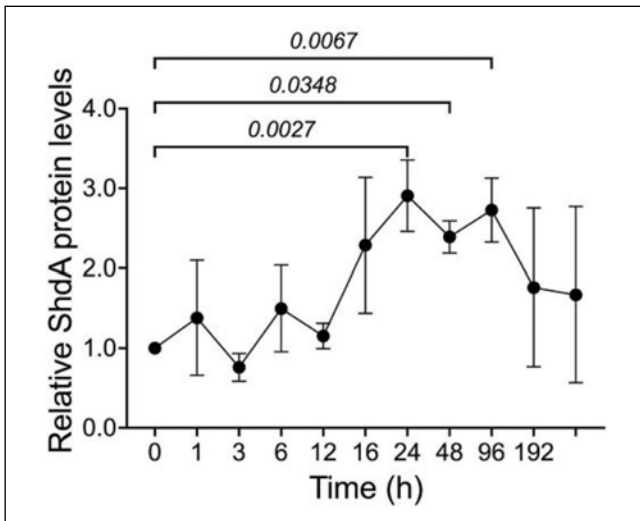
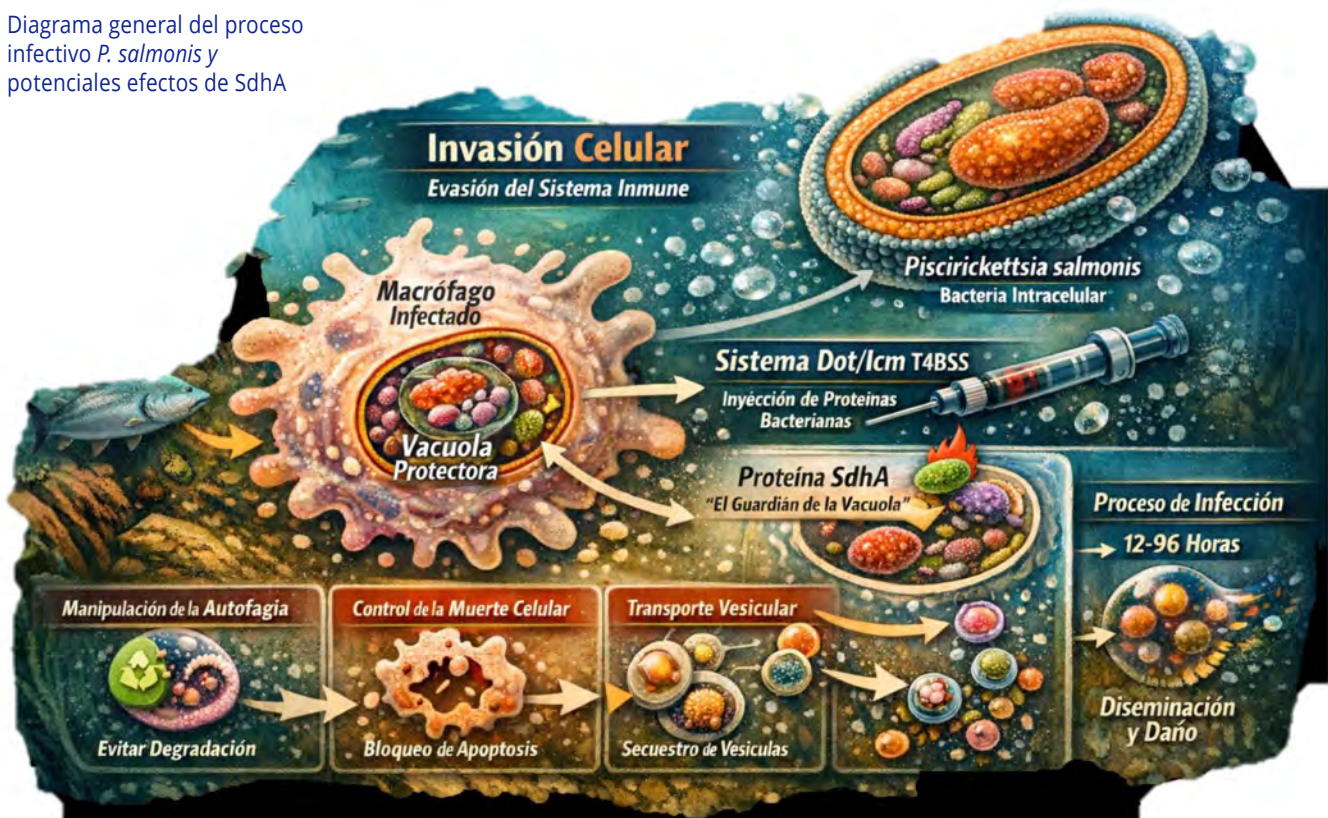


Figura 3: Patrón de expresión diferencial de *sdhA* tras la infección con *Piscirickettsia salmonis* en cultivos de la línea celular SHK-1. La infección cinética se realizó en la línea celular SHK-1 con la cepa *P. salmonis* LF-89, MOI 10. Se realizaron tres réplicas biológicas para cada punto. Se utilizó un anticuerpo contra SdhA de *P. salmonis* en una dilución 1:500. Se utilizó un ANOVA de una vía para analizar las diferencias de expresión con respecto al tiempo cero. Un valor de $p < 0,05$ se consideró estadísticamente significativo. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2025.110929>

de la vacuola protegiendo el nicho de replicación bacteriano, evitando a la bacteria ser transportada a los lisosomas para su degradación; y (iii) motivos como DAKGQ (residuos 372-3769) relacionado con la inhibición de caspasas lo sugiere que SdhA podría regular la apoptosis (muerte celular programada) también en beneficio de la bacteria. La función potencial de SdhA manipulando la autofagia, apoptosis y tráfico vesicular (Figura 4) requiere, sin lugar a dudas, de nuevos estudios para entender como *P. salmonis* manipula las redes de defensa celular.

Las aplicaciones de los hallazgos de este estudio pueden incluir: (i) controlar la piscirickettsiosis con terapéuticos dirigidos a inhibir SdhA o sus dominios funcionales con el fin de reducir la persistencia intracelular de *P. salmonis*, (ii) desarrollar estrategias terapéuticas que inhiban la interacción SdhA con las estructuras celulares para restaurar la fusión fagoso-lisosoma, controlar la apoptosis eliminando tempranamente a las células infectadas, (iii) o mejorar la autofagia para la eliminación de la bacteria. Conociendo la cinética de expresión de SdhA, es posible aprovechar la ventana temporal de expresión como punto crítico para intervenciones tempranas post-exposición. Todo esto requiere seguir avanzando en el conocimiento de los mecanismos de virulencia de *P. salmonis* junto al desarrollo biotecnológico que permitan diseñar y obtener nuevas estrategias terapéuticas.

Diagrama general del proceso infeccioso *P. salmonis* y potenciales efectos de SdhA



FINANCIAMIENTO

FONDECYT Postdoctoral 3180560 (MC), FDP2024-44 (MC); FONDECYT Postdoctoral project No 3210634 (NV), FONDAP 1523A0007 (AR), FONDECYT Regular 1240741 (MI) y Fondecyt Regular 1240259 (KM).

BIOGRAFÍA

Dr. Marcos Cortés Sobarzo obtuvo el título de Bioquímico de la Universidad Austral de Chile en el año 2009 bajo la tutoría de la Dra. Carola Otth y obtuvo el grado de Doctor en Ciencias de la Acuicultura bajo la tutoría del Dr. Alejandro Yáñez y el grado de Doktor der Naturwissenschaften del programa iPUR en convenio entre las universidades Austral de Chile y Regensburg de Alemania durante el año 2015 y 2016 respectivamente, bajo la tutoría del Dr. Reinhard Wirth con la tesis titulada "Study of the type 4B protein secretion system (Dot/Icm) and the effector protein SdhA in *Piscirickettsia Salmonis*". Desarrolló su proyecto postdoctoral con el patrocinio de la Dra. Mónica Imarai en la Universidad de Santiago de Chile. En este período estudió el rol de la proteína SdhA, durante un proceso infeccioso en cultivo primario de células de riñón anterior de salmón (et al. 2026). Actualmente se desempeña como docente en la Universidad Mayor en Temuco, en el Núcleo de Ciencia Biológicas.



REFERENCIAS

- Choi, W. Y., Kim, S., Aurass, P., Huo, W., Creasey, E. A., Edwards, M., . . . Isberg, R. R. (2021). SdhA blocks disruption of the *Legionella*-containing vacuole by hijacking the OCRL phosphatase. *Cell Rep*, 37(5), 109894. doi:10.1016/j.celrep.2021.109894
- Cortés, M., Oliver, C., Sánchez, P., Sánchez, F., Maissey, K., Valdés, N., . . . Imarai, M. (2026). Structure and expression kinetics of *Piscirickettsia salmonis* sdhA during infection of Atlantic salmon macrophage-like cells. *Fish Shellfish Immunol*, 168, 110929. doi:10.1016/j.fsi.2025.110929
- Cortés, M., Sánchez, P., Ruiz, P., Haro, R., Sáez, J., Sánchez, F., . . . Yáñez, A. J. (2017). In vitro expression of Sec-dependent pathway and type 4B secretion system in *Piscirickettsia salmonis*. *Microb Pathog*, 110, 586-593. doi:10.1016/j.micpath.2017.08.003
- Gómez, F. A., Tobar, J. A., Henríquez, V., Sola, M., Altamirano, C., & Marshall, S. H. (2013). Evidence of the presence of a functional Dot/Icm type IV-B secretion system in the fish bacterial pathogen *Piscirickettsia salmonis*. *PLoS One*, 8(1), e54934. doi:10.1371/journal.pone.0054934
- Green, E. R., & Mecsas, J. (2016). Bacterial Secretion Systems: An Overview. *Microbiol Spectr*, 4(1). doi:10.1128/microbiolspec.VMBF-0012-2015
- McCarthy, U. M., Bron, J. E., Brown, L., Pourahmad, F., Bricknell, I. R., Thompson, K. D., . . . Ellis, A. E. (2008). Survival and replication of *Piscirickettsia salmonis* in rainbow trout head kidney macrophages. *Fish Shellfish Immunol*, 25(5), 477-484. doi:10.1016/j.fsi.2008.07.005
- Perez-Stuardo, D., Morales-Reyes, J., Tapia, S., Ahumada, D. E., Espinoza, A., Soto-Herrera, V., . . . Reyes-Cerpa, S. (2019). Non-lysosomal Activation in Macrophages of Atlantic Salmon (*Salmo salar*) After Infection With *Piscirickettsia salmonis*. *Front Immunol*, 10, 434. doi:10.3389/fimmu.2019.00434
- Rozas, M., & Enríquez, R. (2014). Piscirickettsiosis and *Piscirickettsia salmonis* in fish: a review. *J Fish Dis*, 37(3), 163-188. doi:10.1111/jfd.12211

INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA ACUICULTURA CHILENA



Alicia Gallardo Lagno

Asesora Senior centro de referencia CASA de la Organización Mundial de Sanidad Animal (OMSA)

RESUMEN

La incorporación de inteligencia artificial (IA) en la acuicultura representa una oportunidad estratégica para avanzar hacia un modelo productivo más sostenible, resiliente y competitivo. En Chile, país con una acuicultura altamente tecnificada y con una sólida institucionalidad sanitaria, la IA ofrece oportunidades concretas para mejorar la detección temprana de enfermedades, optimizar la vigilancia sanitaria y apoyar la toma de decisiones tanto a nivel productivo como regulatorio. Este artículo presenta una revisión aplicada del uso de IA en acuicultura con énfasis en sanidad acuícola, incorporando ejemplos nacionales e internacionales, y concluye con mensajes clave de política pública para su adopción responsable.

INTRODUCCIÓN

Según la edición 2024 del informe sobre “El estado mundial de la pesca y la acuicultura” (SOFIA) de la FAO, el crecimiento de la acuicultura ha alcanzado hitos sin precedentes, consolidándose como el principal sistema de producción de animales acuáticos a nivel mundial. En 2022, la producción acuícola totalizó 130,9 millones de toneladas, superando por primera vez a la pesca de captura tradicional y representando más del 51 % de la producción global de animales acuáticos. Este aumento refleja no solo la expansión sostenida del sector en las últimas décadas, sino también su creciente contribución a la seguridad alimentaria, la nutrición y los medios de vida de millones de personas, en un contexto donde la demanda mundial de alimentos acuáticos continúa en ascenso.

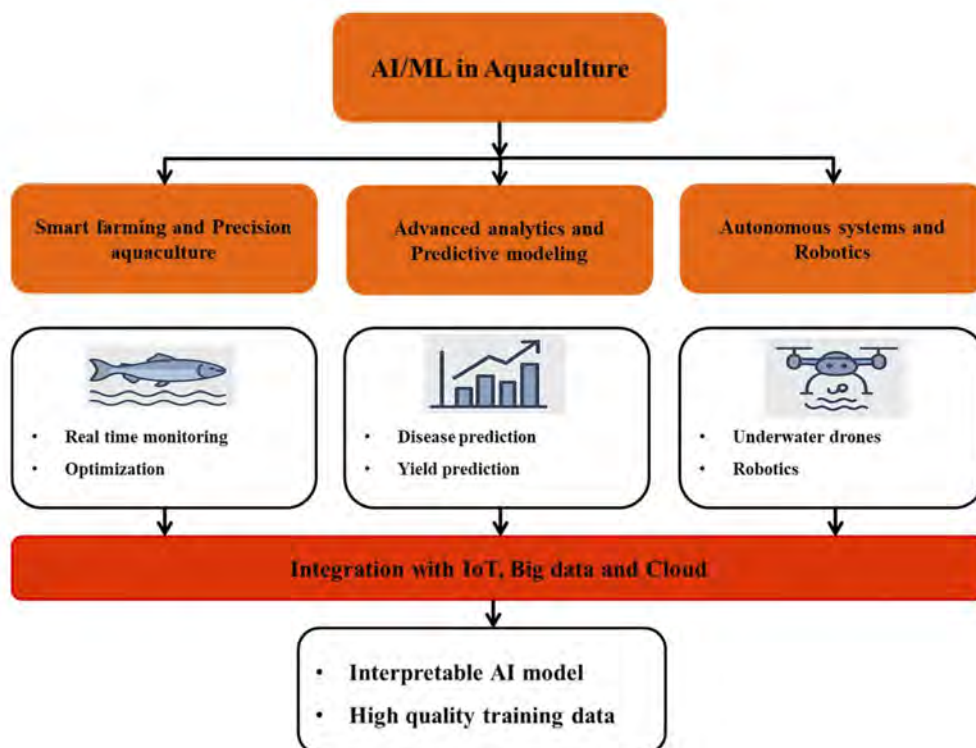


Figura 1: Roy, S. M., Beg, M. M., Bhagat, S. K., Charan, D., Pareek, C. M., Moulick, S., & Kim, T. (2025). Application of artificial intelligence in aquaculture – Recent developments and prospects. *Aquacultural Engineering*, 111, 102570. <https://doi.org/10.1016/j.aquae.2025.102570>

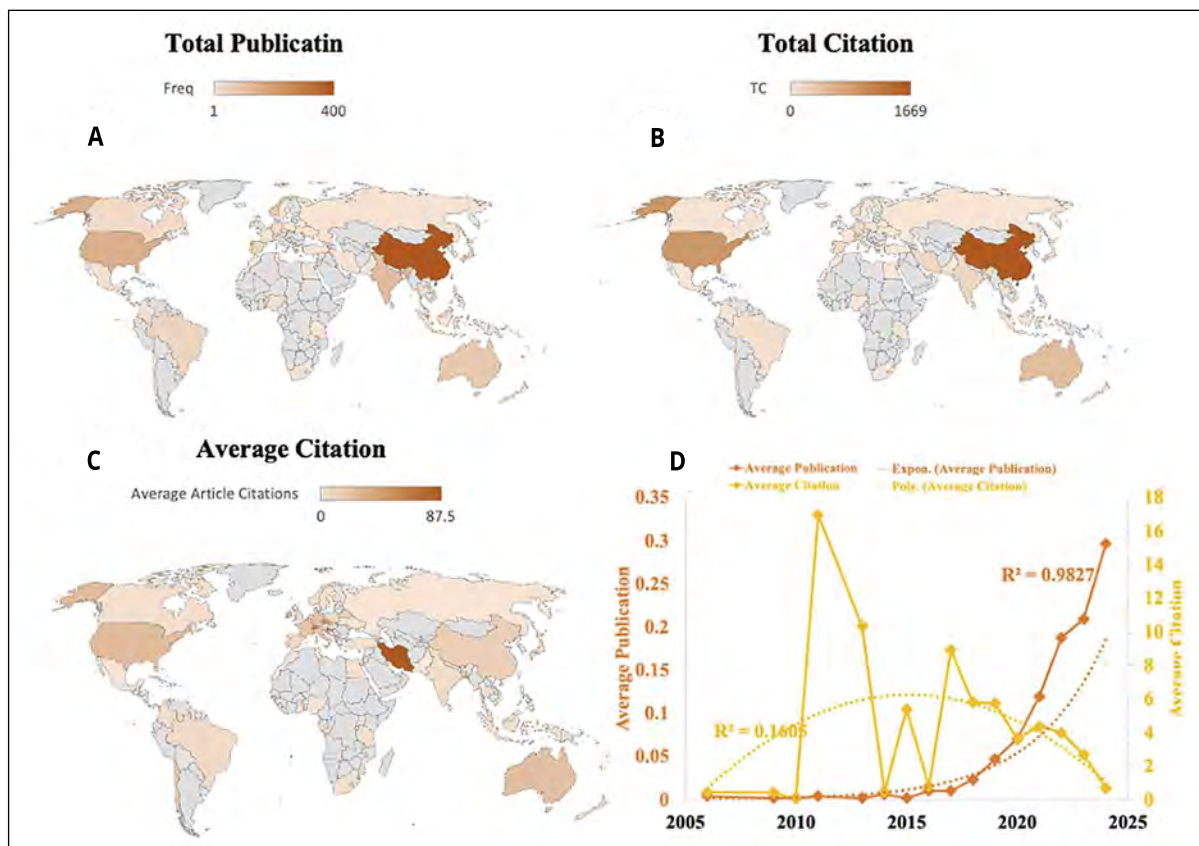


Figura 2: RAs shown in Fig. 1 (A, B, C), the United States has consistently maintained high research quality in terms of total publications, citations, and average citations, as indicated by the uniform intensity of color. In contrast, although China has increased its total publications and citations, the average citation rate has significantly declined over time, indicating a decrease in research quality. On the other hand, Iran leads in average citations per year, showcasing the impact of its research in the field. Overall, the USA remains a reliable leader in terms of research quality, measured by total publications, total citations, and average citations.

Para lograr el crecimiento de la acuicultura en forma sostenible se requiere avanzar en forma global en la producción de alimentos de origen acuático de manera responsable, eficiente y resiliente frente a los desafíos ambientales, sociales y productivos actuales. En este contexto la sanidad animal es un eje central del sistema productivo. La prevención de enfermedades, el fortalecimiento de la bioseguridad y el uso responsable de antimicrobianos son condiciones esenciales para reducir pérdidas, proteger el medio ambiente y asegurar la viabilidad de largo plazo del sector. Tradicionalmente, la sanidad animal en acuicultura se ha basado en sistemas reactivos, donde el diagnóstico ocurre una vez que los signos clínicos son evidentes y la mortalidad ya se ha iniciado. La inteligencia artificial ofrece la posibilidad de transitar hacia modelos predictivos y preventivos, capaces de identificar señales tempranas de enfermedad antes de que se produzcan brotes clínicos.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA) APLICADA A LA ACUICULTURA

La IA se está consolidando como una herramienta clave para modernizar la acuicultura y enfrentar desafíos crecientes asociados a la sanidad animal, la eficiencia productiva y la sostenibilidad ambiental. El trabajo de Roy et al. (2025) revisa de manera sistemática los avances recientes en el uso de IA, machine learning y deep learning en acuicultura, evidenciando un rápido aumento de su aplicación a nivel global durante la última década (Figura 2). El estudio muestra que estas tecnologías permiten integrar información proveniente de sensores, imágenes y registros productivos para mejorar el monitoreo de la calidad del agua, optimizar la alimentación, estimar biomasa y detectar tempranamente enfermedades.

La IA permite analizar grandes volúmenes de datos heterogéneos —imágenes, video, parámetros ambientales y registros productivos— que superan la capacidad de análisis convencional. En sanidad acuícola, estas tecnologías se aplican principalmente a la visión por computador, el análisis de comportamiento y los modelos predictivos basados en datos ambientales. El valor sanitario de la IA radica en su capacidad para identificar patrones tempranos compatibles con enfermedad, antes de que se manifiesten signos clínicos evidentes o aumentos de mortalidad.

EXPERIENCIAS DE USO DE IA EN SANIDAD ANIMAL EN ACUICULTURA

Colaboración FAO-Corea: plataforma SANISMART
Corea del Sur se ha consolidado como uno de los países asiáticos que impulsa el uso de tecnologías digitales avanzadas —incluida la inteligencia artificial— para mejorar la salud y la gestión de sistemas productivos en acuicultura, especialmente en colaboración con organismos internacionales y otros países de la región.

Una de las iniciativas más relevantes impulsadas recientemente es la creación de la plataforma SANISMART, desarrollada en conjunto por SANIPES (Perú), la FAO y el Gobierno de Corea del Sur. Esta herramienta utiliza big data e inteligencia artificial para anticipar riesgos sanitarios en cultivos acuícolas, mejorando la bioseguridad, la trazabilidad y la toma de decisiones de manejo. El sistema se basa en el análisis de grandes volúmenes de datos provenientes de sensores ambientales y registros productivos para identificar patrones compatibles con condiciones de riesgo sanitario en tiempo real o con anticipación.

Taiwán: Sistema de Tratamiento y Diagnóstico (TDS)
TDS es una plataforma en línea integrada que apoya la detección temprana y la predicción de riesgos de enfermedades acuícolas, vinculando datos diagnósticos a nivel de granja con información meteorológica y ambiental.

TDS recopila datos estandarizados de granjas—incluyendo registros diagnósticos, ubicación de granjas y estanques, prácticas agrícolas e historial de tratamiento—e integra automáticamente estos datos con variables estacionales y meteorológicas como la temperatura y las precipitaciones. Mediante el análisis de datos y de tendencias, el sistema identifica los patrones estacionales de riesgo de enfermedades. En el cultivo de tilapia, el SDT se ha utilizado para anticipar un mayor riesgo de enfermedades bacterianas, especialmente *Streptococcus iniae* y *Streptococcus agalactiae*, que están fuertemente asociadas con temperaturas elevadas del agua. El sistema apoya la vigilancia basada en riesgos, la alerta temprana y la acción preventiva oportuna por parte de acuicultores, veterinarios y autoridades.

China: Investigación académica y comportamientos acuáticos

Los cambios en el comportamiento de los animales acuáticos pueden ser identificados usando técnicas avanzadas de inteligencia artificial, lo que aporta una nueva dimensión para monitorear salud y bienestar en sistemas de cultivo” (Zhang & Duan, 2025). China ha avanzado en el estudio del comportamiento de animales acuáticos utilizando técnicas modernas de análisis de datos y aprendizaje automático, que son componentes de sistemas de inteligencia artificial aplicados a la salud y manejo de organismos cultivados. Por ejemplo, investigaciones del “East China Sea Fisheries Research Institute” analizan comportamientos de especies acuáticas en la era de la IA, lo que aporta evidencia científica para desarrollar sistemas que detecten cambios de comportamiento asociados a estrés o enfermedad.

APLICACIONES Y OPORTUNIDADES EN CHILE

Chile presenta condiciones favorables para la adopción de inteligencia artificial en sanidad acuícola, incluyendo una industria tecnificada, disponibilidad de datos y experiencia acumulada en gestión sanitaria.

En la salmonicultura, el uso de sensores remotos, monitoreo ambiental y análisis de datos ha comenzado a integrarse en estrategias de bienestar animal y prevención sanitaria. La IA puede fortalecer estos sistemas mediante la detección temprana de cambios conductuales o ambientales asociados a enfermedades.

Asimismo, existen oportunidades relevantes para aplicar IA en otros subsectores, como la mitilicultura y la acuicultura de pequeña escala, mediante herramientas accesibles que apoyen la vigilancia sanitaria y la notificación temprana.

¿QUÉ SIGNIFICA LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LOS ACUICULTORES?

La inteligencia artificial no es un reemplazo del productor ni del veterinario, sino una herramienta práctica de apoyo al manejo diario.

Para los productores acuícolas, la IA puede traducirse en beneficios concretos como:

- Detección más temprana de problemas sanitarios, antes de que aparezcan mortalidades.
- Alertas automáticas basadas en cambios de comportamiento o calidad del agua.
- Mejor toma de decisiones en alimentación, densidad y manejo preventivo.
- Reducción de pérdidas productivas y del uso innecesario de tratamientos.

El valor principal de la IA para el productor está en anticiparse a los problemas y actuar a tiempo, fortaleciendo la sostenibilidad y rentabilidad de la producción.

La inteligencia artificial (IA) puede aplicarse en la acuicultura para optimizar la producción y fortalecer la sanidad mediante modelos de acuicultura inteligente o de precisión, basados en el monitoreo en tiempo real de parámetros sanitarios, ambientales y productivos. Estos sistemas permiten predecir y generar alertas tempranas de enfermedades, así como avanzar hacia la implementación de tecnologías autónomas y robóticas para el manejo productivo. Para ello, los datos deben ser validados, estandarizados e integrados, de modo de alimentar modelos de IA interpretables y procesos de entrenamiento confiables (Figura 1).

Sin embargo, la IA en acuicultura no representa solo un desafío tecnológico, sino un desafío sistémico. Su implementación efectiva requiere gobernanza de datos, capacidades humanas especializadas, marcos regulatorios modernos y una integración real con la sanidad animal y la bioseguridad. La fragmentación y limitada estandarización de los datos sanitarios, ambientales y productivos restringe la capacidad predictiva de los modelos; la complejidad biológica y multicausal de las enfermedades dificulta transformar señales tempranas en alertas operativas confiables; persiste una brecha de capacidades híbridas que integren sanidad, producción y análisis de datos; y se evidencian vacíos regulatorios y de gobernanza en el uso, interoperabilidad y validación de datos y modelos. En conjunto, estos factores explican por qué muchas iniciativas permanecen como pilotos aislados, sin evolucionar hacia sistemas integrados, escalables y confiables de alerta temprana y automatización en acuicultura.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La IA es un componente central de la “acuicultura inteligente”. La IA, especialmente machine learning y deep learning, ha pasado de ser experimental a constituir un pilar operativo de la acuicultura de precisión, con aplicaciones consolidadas en monitoreo de calidad de agua, detección temprana de enfermedades, análisis de comportamiento, estimación de biomasa y optimización de alimentación y crecimiento.
2. La detección temprana es uno de los mayores aportes sanitarios de la IA. Los mayores avances sanitarios se logran cuando la IA se aplica a análisis de comportamiento (nado, actividad, respuesta al alimento), visión por computador para identificar lesiones, cambios externos o anomalías y en modelos predictivos que integran variables ambientales.

3. La IA favorece un cambio de enfoque de reactivo a predictivo. Permite pasar de una gestión sanitaria reactiva a una gestión predictiva y basada en riesgo, alineándose con los principios modernos de vigilancia sanitaria, bienestar animal y sostenibilidad.

La inteligencia artificial representa una oportunidad estratégica para fortalecer la sanidad animal en la acuicultura chilena. Su adopción debe enmarcarse en políticas públicas que promuevan la innovación, la validación técnica, la equidad en el acceso a la tecnología y la colaboración público-privada.

BIBLIOGRAFÍA

- Bonnichsen, R., Nielsen, G. G. B., Dam, J. S., Schrøder-Petersen, D., & Buchmann, K. (2025). AI-driven realtime monitoring of early indicators for Ichthyophthirius multifiliis infection of rainbow trout. *Journal of Fish Diseases*, 48(1), e14027. <https://doi.org/10.1111/jfd.14027>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2024). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024: La transformación azul en acción. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0461es>
- Roy, S. M., Beg, M. M., Bhagat, S. K., Charan, D., Pareek, C. M., Moulick, S., & Kim, T. (2025). Application of artificial intelligence in aquaculture – Recent developments and prospects. *Aquacultural Engineering*, 111, 102570. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2025.102570>
- SeafoodSource. (2025, 2 mayo). Major Chilean salmon farmers employing artificial intelligence as industry modernizes. SeafoodSource. Recuperado de <https://www.seafoodsource.com/news/aquaculture/major-chilean-salmon-farmers-employing-artificial-intelligence-as-industry-modernizes>
- Ting, C.-C., & Chen, Y.-C. (2024). Forecasting fish mortality from water and air quality data using deep learning models. *Journal of Environmental Quality*, 53, 482–491. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20574>
- Zhang, D., & Duan, M. (2025). A study of aquatic animal behavior in the AI era. *Journal of Fisheries of China*, 49(7), 079103. <https://doi.org/10.11964/jfc.20250514996>



Ingeniería de datos para entornos críticos

Diseñamos soluciones tecnológicas avanzadas que convierten la información en decisiones estratégicas para operaciones acuícolas de alta exigencia.

- » Soluciones adaptadas a entornos críticos
- » Datos en tiempo real
- » Sensores de alta precisión
- » Conectividad y autonomía
- » Integración e interoperabilidad



PRECISIÓN » DURABILIDAD » CONECTIVIDAD » TECNOLOGÍA DISEÑADA PARA OPERAR SIN INTERRUPCIONES

www.bluemetrics.cl

contacto@bluemetrics.cl
+56 9 9583 5216



BLUE METRICS: SOLUCIONES TECNOLÓGICAS PARA UNA ACUICULTURA DE ALTA PRECISIÓN



Startup de base científico-tecnológica desarrolla servicios de monitoreo incorporando el Internet de las Cosas (IoT) para el control de parámetros ambientales en tiempo real, optimizando la operación y eficiencia de la industria salmonera.

En los últimos años, la industria del salmón en Chile ha enfrentado uno de los mayores desafíos de su historia: producir con mayor eficiencia, bajo crecientes exigencias ambientales, sociales y regulatorias, y en un contexto de incertidumbre climática. En este escenario, la disponibilidad de información ha dejado de ser un apoyo operativo para transformarse en un factor crítico de competitividad.

La convergencia entre digitalización, automatización y análisis avanzado de datos ha dado origen a la acuicultura 4.0 que se caracteriza por un modelo productivo inteligente de alta precisión basado en la integración de sensores, protocolos de comunicación IoT, plataformas de monitoreo en tiempo real y herramientas de apoyo a la toma de decisiones operacionales. Su objetivo es claro: anticipar riesgos, optimizar procesos y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas productivos.

INNOVACIÓN TECNOLÓGICA APLICADA A SISTEMAS RAS

A diferencia de los modelos tradicionales, caracterizados por mediciones discontinuas y una dependencia de la experiencia empírica, Blue Metrics ha desarrollado una propuesta de alta precisión orientada a responder directamente a las demandas actuales de la acuicultura avanzada en Chile, combinando conocimiento científico, ingeniería aplicada y experiencia productiva.

Esta innovación tecnológica permite transformar grandes volúmenes de datos en información accionable, facilitando una gestión predictiva más que reactiva. Variables como temperatura, oxígeno disuelto, pH y dióxido de carbono dejan de ser parámetros aislados para convertirse en indicadores integrados del desempeño productivo, permitiendo el monitoreo continuo y remoto de variables críticas en sistemas acuícolas de recirculación (RAS), centros de engorda, transporte y operaciones en agua dulce y marina.

DESARROLLO TECNOLÓGICO DE BLUE METRICS

Blue Metrics es una empresa tecnológica que está redefiniendo la forma en que la acuicultura y la gestión ambiental monitorean el agua. Lo que comenzó como una iniciativa de investigación aplicada, hoy se ha transformado en una plataforma de innovación que integra Internet de las Cosas (IoT), sensores avanzados y analítica de datos para ofrecer monitoreo ambiental en tiempo real.





Estas tecnologías entregan información continua y confiable para apoyar decisiones productivas, científicas y regulatorias, reduciendo costos operativos y aumentando la resiliencia de la industria acuícola y de los ecosistemas costeros.

La Startup también realiza actividades de investigación, innovación y desarrollo tecnológico, incluyendo consultorías, servicios técnicos y transferencia tecnológica en automatización y digitalización de procesos productivos acuícolas.

EXPERIENCIAS EN ENTORNOS PRODUCTIVOS

Una demostración del impacto de las soluciones de Blue Metrics se observa actualmente en el sistema de cultivos multitróficos de la Universidad Católica del Norte - Campus Guayacán, donde se implementó el monitoreo ambiental y control automático de oxígeno en estanques de peces marinos.

En este entorno, los sistemas permitieron mantener el oxígeno disuelto dentro de rangos óptimos previamente definidos, regulando automáticamente su inyección en función de las condiciones reales del cultivo. “Antes dependíamos de mediciones periódicas y ajustes manuales. Hoy contamos con información continua y un sistema que regula el oxígeno en tiempo real, lo que nos permite mantener condiciones estables para los peces y reducir significativamente el riesgo operativo”, explicó el investigador encargado del sistema de cultivos multitróficos de la UCN y usuario de las soluciones de Blue Metrics, Dr. Nicolás Ory.

Esta experiencia demuestra cómo la tecnología desarrollada por la Startup no solo responde a necesidades industriales, sino que también fortalece procesos de investigación aplicada, desarrollo y transferencia tecnológica.



TECNOLOGÍA DISEÑADA PARA CONDICIONES EXIGENTES

Uno de los principales diferenciadores de Blue Metrics es su enfoque en el diseño de soluciones adaptadas a las condiciones reales de la acuicultura chilena, caracterizada por centros emplazados en zonas remotas, condiciones oceanográficas adversas y limitaciones geográficas.

Para responder a estos desafíos, la empresa ha incorporado sistemas de comunicación independientes y de largo alcance, capaces de operar en entornos con baja o nula conectividad tradicional, asegurando la transmisión continua de información hacia plataformas de análisis y gestión.

Asimismo, ha integrado sensores ópticos, robustos y de baja mantención, reduciendo la necesidad de calibraciones frecuentes, disminuyendo los costos asociados a mantención correctiva. La interoperabilidad con plataformas existentes, como sistemas PLC y SCADA, permite además una modernización progresiva y escalable, facilitando la adopción tecnológica sin reemplazar completamente la infraestructura instalada.

DATOS COMO ACTIVO ESTRATÉGICO PARA LA TRAZABILIDAD

El escenario regulatorio y sanitario de la industria acuícola chilena avanza hacia mayores exigencias en materia de confiabilidad, respaldo técnico, calidad y transparencia operativa. En este contexto, la capacidad de generar datos continuos y auditables se ha transformado en un activo estratégico para responder a los estándares de exportación establecidos por los mercados internacionales.

Las soluciones de Blue Metrics convierten la información en una herramienta clave para la gestión, el cumplimiento normativo y la toma de decisiones basada en evidencia. “La acuicultura de alta precisión permite avanzar hacia modelos donde la tecnología respalda no solo la eficiencia productiva, sino también la reputación del sector. La información confiable se ha convertido en un componente central de la competitividad internacional”, indicó el socio fundador de Blue Metrics, Sebastián Messina.

Los principales mercados de destino del salmón chileno han elevado sus estándares en sostenibilidad, bienestar animal y gestión ambiental. En este escenario, contar con registros ambientales continuos y datos históricos verificables fortalece la posición competitiva de la industria acuícola nacional.

A través de soluciones como las de Blue Metrics se promueve un crecimiento productivo basado en el uso responsable de los recursos marinos enmarcados en la tendencia y principios de conservación y sostenibilidad de la economía azul.

Organismos como la FAO y la OCDE proyectan que más del 50 % del crecimiento futuro en la producción de alimentos acuáticos dependerá de la acuicultura, situando a la industria frente al desafío de aumentar su eficiencia sin comprometer el entorno donde se emplazan los centros de cultivo.



RESILIENCIA FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático ha intensificado la variabilidad ambiental tanto en el océano como en fiordos y canales del sur de Chile, alterando patrones de temperatura, oxigenación y calidad del agua en general.

“Más que reaccionar ante contingencias, la acuicultura de alta precisión propone comprender el sistema en su dinámica y anticipar escenarios. El monitoreo continuo se convierte en un insumo tecnológico esencial para la resiliencia del sector”, destaca Maximiliano Santander, socio fundador de Blue Metrics.

La capacidad de detectar desviaciones tempranas y analizar patrones históricos permite implementar estrategias de gestión adaptativa, reduciendo riesgos productivos y fortaleciendo la estabilidad operacional.

PROYECCIÓN Y CONSOLIDACIÓN EN EL SUR DE CHILE

En la actualidad, la tendencia global apunta hacia modelos donde el monitoreo en tiempo real se complementa con análisis predictivos, automatización avanzada e inteligencia artificial aplicada a la gestión productiva.

Desde esta perspectiva, la Startup contribuye a llevar la acuicultura chilena al siguiente nivel, sentando las bases para una operación predictiva, eficiente y más competitiva.

Durante 2026, Blue Metrics proyecta consolidar su presencia en la Región de Los Lagos y el sur austral mediante alianzas estratégicas, proyectos piloto y participación activa en ferias especializadas, fortaleciendo su rol como socio tecnológico de la salmonicultura nacional.

Con una propuesta basada en innovación, confiabilidad y adaptación al entorno local, busca posicionarse como un actor clave en la construcción del futuro de la acuicultura inteligente y de precisión en Chile.



Maximiliano Santander, Cofundador
Blue Metrics Ltda.
m.santander@bluemetricsiot.com



Sebastian Messina, Cofundador
Blue Metrics Ltda.
s.messina@bluemetricsiot.com

Implementando una estrategia de adaptación al cambio climático en la fase de engorda de la salmonicultura



Doris Soto¹, Marcelo Fuentes¹, Jorge León-Muñoz^{1,3}, Carlos Chávez^{1,2}, Jorge Dresdner¹ y Carlos Molinet^{1,4}

¹ Interdisciplinary Center for Aquaculture Research, Universidad de Concepción, Chile

² Facultad de Economía y Negocios, Universidad de Talca, Chile

³ Departamento de Química Ambiental, Facultad de Ciencias, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile

⁴ Universidad Austral de Chile, Puerto Montt, Chile

CAMBIO CLIMÁTICO Y SU IMPACTO SOBRE LA ACUICULTURA

Los forzantes directos e indirectos del cambio climático pueden afectar la acuicultura a través de numerosas amenazas que, a su vez, pueden generar diversos impactos. Ejemplos de impactos a corto plazo incluyen la pérdida de producción o infraestructura debido a eventos hidro-climáticos extremos (tormentas, inundaciones, sequías, etc.), eventos anómalos que afectan los cuerpos de agua (eventos hipóxicos, olas de calor, floraciones de algas nocivas) con la consecuente disminución de la productividad debido a cambios en la temperatura, la salinidad, el pH, etc., que generan condiciones de cultivo deficientes. Los impactos de largo plazo incluyen la reducción de la productividad debido al incremento paulatino de condiciones desfavorables para los individuos cultivados, tales como desafíos fisiológicos como el aumento de la temperatura del agua, escasez de insumos como semillas silvestres, acceso limitado a agua dulce (calidad y cantidad) para la acuicultura, acceso limitado a alimentos de fuentes marinas y terrestres, acidificación de los océanos, aumento del nivel del mar, etc. (De Silva y Soto 2009; Dabbadie *et al.*, 2018; Soto y Fuentes, 2025; Soto y García-Sampaio, 2025).

A menudo, los impactos del cambio climático se perciben como una multiplicidad de factores, incluyendo aquellos que afectan el suministro de semillas, alimento o insumo para los mismos y toda la cadena de valor. Los riesgos del cambio climático pueden ser muy complejos y difíciles de evaluar, sin embargo, existen marcos conceptuales generales que son ampliamente aceptados. Este es el caso de la propuesta del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) que describe el riesgo

como una función de las amenazas y su interacción con la exposición y la vulnerabilidad. La vulnerabilidad por su parte, está compuesta por la sensibilidad (lo que aumenta la probabilidad de pérdidas y daños) y la capacidad de adaptación (IPCC, 2022), de modo que:

Riesgo (R) = f [amenaza (H), exposición (E) y vulnerabilidad (Va)], donde Va = f [sensibilidad (S) y capacidad de adaptación (AC)].

Un elemento clave en este marco de análisis es que el riesgo generado por el cambio climático para la acuicultura está relacionado positivamente con la amenaza, la exposición y la sensibilidad, en tanto la relación es negativa con la capacidad de adaptación (Fig. 1A). Consecuentemente el riesgo puede reducirse

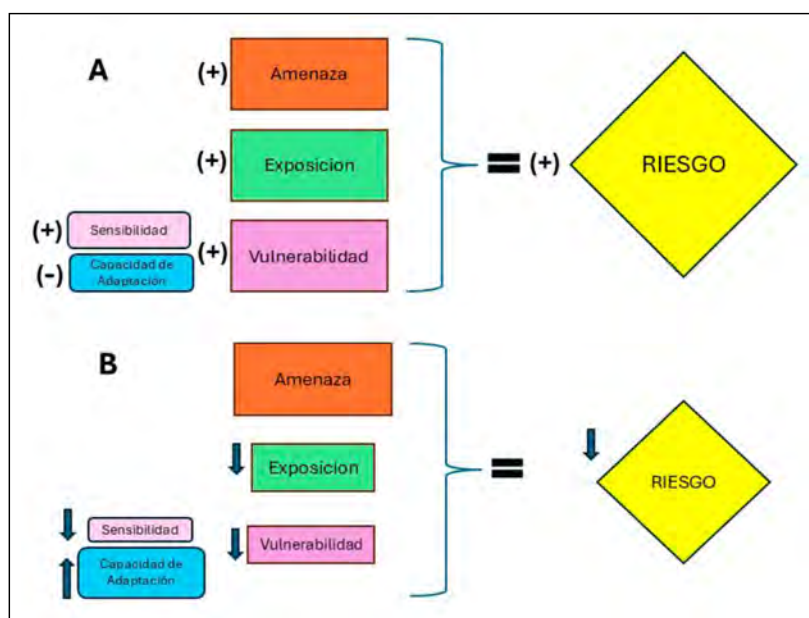


Figura 1: Marco general de riesgo climático, A) según IPCC (2022) y B) escenario donde el riesgo se ha reducido a partir de una reducción de la Exposición, de la Sensibilidad y de un incremento de la Capacidad de Adaptación.

justamente reduciendo la exposición y/o la sensibilidad y/o incrementando la capacidad de adaptación (Fig. 1B). El papel de cada uno de estos componentes en la variación del riesgo dependerá del contexto del sistema acuícola.

¿CÓMO AVANZAR HACIA UNA ACUICULTURA CLIMÁTICAMENTE INTELIGENTE EN CHILE IMPLEMENTANDO UNA ESTRATEGIA DE ADAPTACIÓN?

El cambio climático presenta importantes desafíos tanto para la salmonicultura como para la mitilicultura en Chile primeramente relacionados con tendencias de reducción de precipitaciones, especialmente en el norte de la Patagonia. Los Atlas de Riesgo frente al Cambio Climático (ARCLIM) se pueden observar en la plataforma del Ministerio del Medio Ambiente (https://arclim.mma.gob.cl/atlas/sector_index/acuicultura/) donde se describen los niveles de riesgo comparativos para ambos sectores y los principales componentes del riesgo (Soto *et al.*, 2020).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ha publicado recientemente un marco estratégico de adaptación al cambio climático en acuicultura (Soto y García-Sampaio, 2025) el cual propone un proceso de 6 pasos que involucra la participación de actores clave y una planificación basada en la mejor evidencia y que se describen a continuación utilizando como ejemplo un análisis de riesgo climático general para la salmonicultura en su fase de engorda en el sur de Chile:

1. Unidad espacial y/o geopolítica de adaptación. Para hacer una estrategia de adaptación operativa y práctica, es necesario que se defina la unidad de adaptación donde se analizará el riesgo y donde se implementarán medidas, por lo cual es relevante que esta unidad geopolítica tenga un sistema de gobernanza mínimo, el cual debe incluir algún sistema de colecta y monitoreo de información. Esta unidad puede ser una comuna donde se desarrollan actividades acuícolas y podría considerar todas las actividades acuícolas, desarrollando mapas de riesgo acuícola comunales y sus correspondientes estrategias de adaptación. A una escala menor las unidades de adaptación podrían ser las comunidades acuícolas costeras o, por ejemplo, un área de productores acuícolas en un fiordo o bahía. También una empresa que tiene varios centros de cultivo en un amplio rango geográfico puede usar este marco considerando cada concesión o centro como una unidad de adaptación y así puede establecer riesgos comparativos y una estrategia ad hoc a estos. Los casos de estudio para el marco estratégico de adaptación propuestos por la FAO (Soto *et al.*, 2021a,b) utilizaron los actuales barrios o Agrupaciones de concesiones de Salmónidos (ACS) para la salmonicultura y las comunas para la mitilicultura, esencialmente por que la información sobre producción (equivalente a la Exposición en el modelo propuesto) y otros aspectos de Sensibilidad estaban disponibles a estas escalas (Soto *et al.*, 2020)

2. Identificar y seleccionar las trayectorias y modelos de proyección del cambio climático más adecuados para las áreas acuícolas predefinidas. En esta etapa se requiere del apoyo de expertos en modelación y proyección climática y sus implicancias para el océano costero y sistemas acuáticos que albergan la actividad.

El cambio climático ya se manifiesta claramente y en particular por la reducción de las precipitaciones en la Patagonia norte. Este puede ser el principal forzante de cambios y amenazas directas e indirectas para la salmonicultura y para la mitilicultura chilena (Soto *et al.*, 2020), por ejemplo, la ocurrencia de Floraciones Algales Nocivas (FAN) (León-Muñoz *et al.*, 2018; Soto *et al.*, 2021; Díaz *et al.*, 2025)

3. Evaluación del riesgo y en lo posible la vulnerabilidad en la unidad definida. Esta tarea crucial, implica predecir e identificar las amenazas más significativas para orientar las acciones y escalas temporales de adaptación utilizando proyecciones climáticas, escenarios y alcances apropiadamente definidos. Se recomienda utilizar el modelo de riesgo/vulnerabilidad que ha propuesto el IPCC (Fig. 1). Un ejemplo con un modelo simple de análisis de riesgo para la acuicultura en el sur de Chile adaptado de IPCC, es aquel elaborado por Soto *et al.* (2020; 2021a), que en el caso de la salmonicultura identificó dos amenazas principales, el incremento de FAN (https://arclim.mma.gob.cl/atlas/view/acuicultura_f_salmon_fan/) y el incremento de parasitismo (Caligus; https://arclim.mma.gob.cl/atlas/view/acuicultura_f_salmon_para/) y ambos riesgos se representan en los mapas de riesgo de ARCLIM.

Una elaboración actualizada permite estimar un riesgo climático general utilizando como indicador de la amenaza climática solo la proyección de sequía para las tres regiones donde se realiza la engorda de salmónidos en balsas jaulas (Fig. 2). Este indicador representa el forzante más relevante en el caso chileno (León-Muñoz *et al.*, 2018) y es uno de los más relevantes para la acuicultura a nivel global (Shovon *et al.*, 2025). La reducción de las precipitaciones desencadena amenazas más directas como incremento de la temperatura superficial del mar, incremento de la salinidad, incremento de parasitismo, de FAN y de hipoxias. Así se puede representar un riesgo general para la salmonicultura frente al cambio climático a escala de ACS. En la Figura 2 donde se muestran las ACS ordenadas de latitudinalmente de norte a sur, se puede observar que la amenaza climática identificada, es mayor en la Patagonia Norte y va declinando hacia al sur. De esta forma la amenaza es mínima en Magallanes. Ello no significa que el cambio climático no pueda tener efectos en Magallanes, solo indica que este forzante, “reducción de precipitaciones” no se proyecta para la zona más austral. Sin embargo, allí podrían manifestarse como amenazas, el incremento de derretimiento de glaciares, incremento de flujo de agua dulce, etc., pero ello aún no ha sido estudiado adecuadamente. En el modelo utilizado aquí, el riesgo climático es mayor cuando la amenaza es mayor y ello coincide, por ejemplo, con una exposición elevada, en este caso representada por la producción de salmónes por ACS (representada por la cosecha promedio 2021-2022). Además, cuando ello coincide con valores elevados de otros factores de

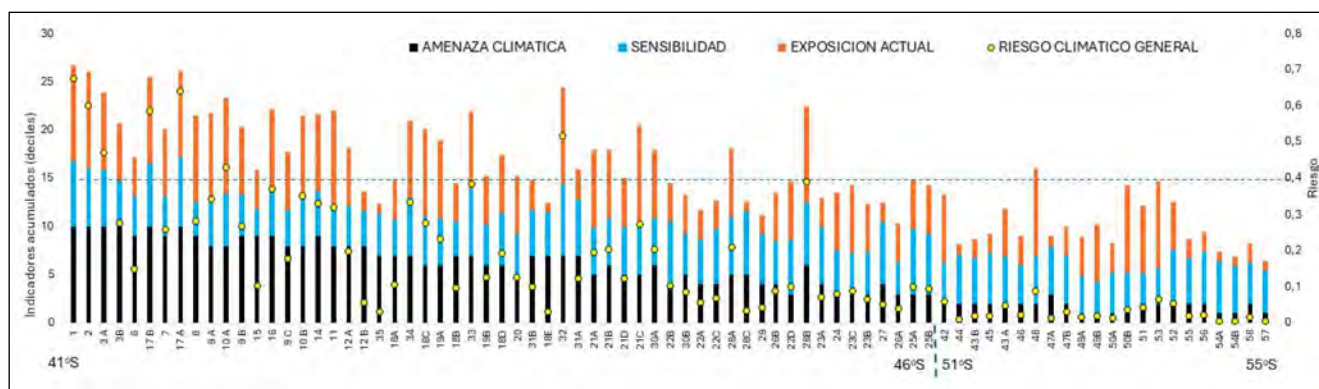


Figura 2: Componentes del riesgo climático general para la salmonicultura para cada ACS de norte a sur (izquierda a derecha) considerando como exposición el promedio cosechado en 2021-2022 y factores de sensibilidad descritos en Soto *et al.* (2020, 2025) actualizados. Las ACS están organizadas aproximadamente de acuerdo con su posición geográfica en latitud sur.

sensibilidad (Fig. 2) como, una tasa de renovación del agua comparativamente menor, condiciones naturales de hipoxia en el fondo de los cuerpos de agua, etc. A lo anterior se suman las condiciones específicas de gestión de la producción que incrementan la probabilidad de impacto y pérdida productiva como, por ejemplo, ante una anoxia o de un incremento de salinidad (Soto *et al.*, 2020, Soto y García-Sampaio, 2025). Claramente existe una multiplicidad de factores tanto naturales como antrópicos y de gestión que pueden influir en el impacto del cambio climático y de la adaptación, las cual apunta justamente a reducir aquellos factores que se pueden controlar. Por ejemplo, la densidad productiva por centro de cultivo y por área, el momento en que los peces juveniles se ingresan al agua de mar, el tiempo de uso y la producción acumulada por área de la ACS, pre-existencia de ciertas enfermedades, pre-existencia de FAN, monocultivo de una especie en un área (ej. ACSs solo con salmón del Atlántico vs área que contienen Atlántico, trucha y coho entremezclados espacialmente).

Así varias ACS, principalmente en la región de Los Lagos, presentan riesgo climático mayor a 0,4 y si bien este es solo un valor relativo, en la comparación de todas las ACS (Fig. 2), resultante del modelo indicado en la Fig. 1, su mayor utilidad es la orientación de esfuerzos de adaptación hacia estas unidades geográficas. Sin embargo es importante señalar que el uso de la reducción de precipitaciones como forzante general no permite establecer las amenazas más directas para cada ACS por lo cual el monitoreo y seguimiento de las condiciones ambientales es fundamental ya que en algunas ACS el forzante podría generar hipoxias y en otras podría facilitarse un incremento notable de caligus o de FAN, o de todas las anteriores etc.

4. Diseño de un plan de adaptación para reducir la Exposición y Sensibilidad identificadas, y aumentar la Capacidad adaptativa de la unidad geográfica o sistema acuícola. Notar que la Sensibilidad y la Capacidad adaptativa son los principales componentes de la vulnerabilidad en el modelo IPCC (Fig 1). Esto incluye establecer un cronograma de implementación (acciones a corto, mediano y largo plazo) y seleccionar las mejores opciones

de adaptación evaluando la efectividad, costos y dificultades técnicas, considerando que las acciones pueden ser individuales y/o a menudo colectivas para lograr una estrategia a escala de ACS. También se deben tener en cuenta los beneficios y daños colaterales, considerando especialmente el potencial de mala adaptación, por ejemplo, cuando las medidas de adaptación incrementan la huella de carbono. Un caso común ocurre cuando se requiere mayor oxigenación para prevenir o combatir hipoxia, y esto implica mayor uso de energía fósil.

El rol de una mejor gestión de la acuicultura como un elemento clave para reducir los riesgos frente al cambio climático

La distribución espacial de la producción es un elemento esencial y determinante de la exposición y sensibilidad frente al cambio climático y ello ya se ha presentado y discutido en el caso de la salmonicultura y mitilicultura chilena en numerosas publicaciones (Soto *et al.*, 2020; 2021a,b; Molinet *et al.*, 2025). Una alta concentración de producción de salmones que pudiera sobrepasar la capacidad de carga de los ecosistemas, incrementa el riesgo para la producción misma y para el ambiente. El Centro Interdisciplinario para la Investigación Acuícola (INCAR) ha propuesto avanzar hacia un sistema de semáforo que regule la producción de salmones por área, considerando las áreas de los cuerpos de agua (ACS), factores oceanográficos e hidro-climáticos, además de aspectos de gestión productiva que puedan incidir en la capacidad de carga de los cuerpos de agua que sostienen la producción (<https://centroincarc.cl/wp-content/uploads/2022/07/PolicyBrief11Incar.pdf>; Soto *et al.*, en revisión). Una pregunta clave es ¿Cuánto y dónde puede mantenerse y/o crecer la producción de salmones sin afectar su propia resiliencia y la de los ecosistemas?

La reducción de la exposición en ciertas áreas e incremento en otras, debe abordar esta pregunta para lo cual se requiere de mejores sistemas de monitoreo ambientales y oceanográficos permanentes, especialmente en aquellas áreas de mayor riesgo. Por otra parte, la adopción de medidas como reducción de la exposición tiene costos para los privados y para el estado, por lo cual es necesario implementar mecanismos e incentivos para que ello ocurra y la posibilidad de relocalización en otras áreas es uno

de ellos (Soto *et al.*, 2025b). También es importante facilitar el establecimiento de policultivos (más de una especie de salmonídeos) para evitar riesgos de enfermedades potenciadas por el cambio climático y de integración espacial multitrófica con otras especies, por ejemplo, salmones y mejillones (Camelo *et al.*, 2021) para controlar nutrientes y potencialmente reducir la incidencia de *Caligus* (Montory *et al.*, 2020). Todas estas medidas requieren necesariamente la mejor información ambiental y productiva además de suficiente evidencia de su efectividad.

La mejor gestión sanitaria de la producción es el primer paso hacia la adaptación al cambio climático en la mayoría de los sistemas de cultivo (a nivel global) y para las principales amenazas, especialmente considerando el papel del incremento de la temperatura y de la salinidad en la incidencia de enfermedades y en el incremento de la hipoxia. Peces sanos y no estresados serán más resilientes frente a estas amenazas. Además, buenos sistemas de bioseguridad y bienestar animal son medidas win-win, es decir tienen impactos positivos aún en ausencia de cambio climático. Estas medidas se consideran dentro de los mecanismos de reducción de la sensibilidad y deberían ser altamente costo/efectivas (Soto y García-Sampaio, 2025).

La evaluación de los elementos de costo/efectividad de las medidas de adaptación y cómo se distribuyen estos entre las partes interesadas es esencial para la selección de las medidas más efectivas para la reducción de la producción (menor exposición), medidas de bioseguridad reforzadas (menor sensibilidad), modificación de los tiempos de siembra y cosecha en el mar (incremento de la capacidad de adaptación) y además considerando medidas adicionales en el ámbito de la tecnología e innovación (incremento de capacidad adaptativa). En este último ámbito, han surgido muchos tipos de innovaciones tecnológicas tales como los sistemas de micro y nano burbujas, sistemas de monitoreo y alertas preventivas basadas en IA, etc. Sin embargo, la información sobre efectividad más allá de la experimentación en unidades piloto, laboratorio y estanques de prueba es aún escasa y ello representa una brecha para la toma de decisiones. Es necesario que exista un monitoreo de efectividad de las medidas que están adoptando los productores y que esta información se comunique y se comparta para si apoyar mejores decisiones privadas y publicas.

La selección de medidas de adaptación es un proceso individual (cada centro de cultivo), pero también colectivo cuando la unidad de gestión es una ACS, y aquí se manifiesta el fundamental rol del estado. Algunos temas y desafíos que evidencian su rol para incrementar la capacidad adaptativa frente al cambio climático podrían involucrar: la gestión en forma integrada de una mortalidad masiva debida a una FAN o hipoxia a escala de ACS, la promoción de policultivos o cultivos integrados a escala de ACS, la facilitación de la cooperación público-privada para estas unidades productivas, la promoción de investigación permanente para abordar la adaptación al cambio climático, etc. Un buen plan de adaptación debe además considerar los recursos humanos y financieros disponibles y las apropiadas escalas temporales y espaciales. Los ajustes normativos son también esenciales para un buen plan.

5. Implementar la estrategia siguiendo el plan de implementación y procurando procesos participativos, transparentes y basados en evidencia científica o bien respaldada en el caso del conocimiento local. Claramente la capacidad adaptativa involucra por sobre todo una mejor gobernanza para la adaptación, la cual debe basarse en la participación equilibrada, involucrando a todos los grupos interesados incluyendo a aquellos que velan por los sistemas naturales y humanos.

Durante la implementación, es crucial reconocer y gestionar las brechas que limitan la efectividad de las medidas. Entre ellas destacan:

Dificultades para relocalizar la producción desde áreas de alto riesgo hacia zonas más seguras, debido a limitaciones normativas, económicas o técnicas.

Falta de evaluaciones apropiadas de la capacidad de carga de los ecosistemas, lo que impide definir límites de producción que garanticen resiliencia y sostenibilidad en el tiempo.

Insuficiencia de monitoreos permanentes y o sistemas de información que integren datos productivos, ambientales y climáticos necesarios para la toma de decisiones adaptativas.

Asimismo, se requiere fortalecer la gobernanza para la adaptación, asegurando una participación equilibrada de todos los actores (sector privado, comunidades, organismos públicos y científicos), incluyendo a aquellos que velan por los sistemas naturales y humanos. Esto implica generar espacios de diálogo y cooperación que permitan acordar medidas colectivas a escala de ACS o región, e incluso supra-regionales.

6. Realizar monitoreo y evaluación continua de las gestiones y medidas implementadas para mejorar la eficiencia y efectividad de estas, sus costos y/o dificultades técnicas de tal forma que la estrategia sea también adaptable y mejorable. Esto conlleva esfuerzos y la necesidad de colaboración público-privada y ajustes normativos.

AGRADECIMIENTOS

Este documento se ha generado a partir de numerosas investigaciones apoyadas por INCAR y gracias al financiamiento de FONDAP-ANID N°1523A0007. Los autores agradecen además el apoyo y contribución de Fernanda García-Sampaio y de la Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas; FAO. Los autores agradecen también la colaboración e información generada por IFOP y el apoyo de la iniciativa ARCLIM del Ministerio de Medio Ambiente.

REFERENCIAS

- Camelo, S, Molinet, C, Soto, D. 2021. Recommendations for implementing integrated multitrophic aquaculture in commercial farms at the landscape scale in southern Chile, *Aquaculture*, 544, 737116. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737116>
- Dabbadie, L, Aguilar-Manjarrez, JJ, Beveridge, MCM, Bueno, PB, Ross, L.G, Soto, D. 2018. Effects of Climate Change on Aquaculture: Drivers, Impacts and Policies. En: Barange, M, Bahri, T, Beveridge, MCM., Cochrane, KL, Funge-Smith, S., Poulain, F. (eds), *Impacts of climate change on fisheries and aquaculture: Synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 627, pp. 449–463. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i9705en>
- De Silva, SS, Soto, D. 2009. Climate change and aquaculture: potential impacts, adaptation and mitigation. En: Cochrane, K, De Young, C, Soto, D, Bahri, T. (eds) *Climate Change Implications for Fisheries and Aquaculture: Overview of Current Scientific Knowledge*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. No. 530. Rome, FAO. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i0994e>
- Díaz, PA, Basti, L, Pérez-Santos, I, Schwerter, C, *et al.* 2025. The risk of high-biomass HABs: Triggers and dynamics of a non-toxic bloom of *Prorocentrum micans* in Chilean Patagonia. *Science of The Total Environment*, 958, 178140. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178140>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Pörtner, HO, Roberts, DC, Tignor, M, Poloczanska, ES, Minterbeck, K, Alegría, A, Craig, M, Langsdorf, S, Löschke, S, Möller, V, Okem, A, Rama B (eds)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- León-Muñoz, J, Urbina, MA, Garreaud, R, Quiñones, JL. 2018. Hydroclimatic conditions trigger record harmful algal bloom in western Patagonia (summer 2016). *Sci. Rep.*, 8: 1330. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19461-4>
- León-Muñoz, J, Aguayo, R, Corredor-Acosta, Tapia, F., Reid, B., Soto, D. 2024. Hydrographic shifts in coastal waters reflect climate-driven changes in hydrological regimes across Northwestern Patagonia. *Sci Rep.* 14, 20632. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71008-y>
- Molinet, C, Soto, D, León-Muñoz, J, Díaz, M, Espinoza, K, Henríquez, J, Matamala, T. 2025. Climate-Driven Changes in Freshwater Inputs to a northern Patagonia Fjord and overfishing of wild mussel seed could threaten Chilean mussel farming. *Climatic Change*. Springer, 178(6): 1-19. <https://doi.org/https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4477580/v1>
- Montory, JA, Chaparro, OR, Averbuj, A, Salas-Yanquin, LP, Büchner-Miranda, JA, Gebauer, P, Cumillaf, JP, Cruces, E. 2020. The filter-feeding bivalve *Mytilus chilensis* capture pelagic stages of *Caligus rogercresseyi*: A potential controller of the sea lice fish parasites. *J Fish Dis.* 43(4): 475-484. <https://doi.org/10.1111/jfd.13141>
- Soto, D, León-Muñoz, J, Molinet, C, Soria-Galvarro, Y, Videla, J, Opazo, D, Díaz, P, Tapia, F, Segura, C. 2020. Mapas de Riesgo Climático para la Acuicultura Chilena, Proyecto ARCLim, Report. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia y Centro de Cambio Global UC para el Ministerio del Medio y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). 29 pp. https://arclim.mma.gob.cl/media/informes_consolidados/01_ACUI CULTURA.pdf
- Soto, D, Chávez, C, León-Muñoz, J, Luengo, C, Soria-Galvarro, Y. 2021a. Chilean salmon farming vulnerability to external stressors: the Covid 19 as a case to test and build resilience. *Marine Policy* 128 (2021) 104486. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308597X2100097X>
- Soto, D, León-Muñoz, J, Garreaud, R, Quiñones RA, Morey F. 2021b. Scientific warnings could help to reduce farmed salmon mortality due to harmful algal blooms, *Marine Policy*, 132, 104705. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104705>
- Soto, D, García-Sampaio, F, eds. 2025. *Aquaculture Adaptation Framework for Climate Change (Aqua-Adapt) – A tool to support the development and implementation of strategies to improve aquaculture's resilience to climate change*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Papers, No. 739. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cd6476en>
- Soto, D, Fuentes M. 2025. Status, issues, and challenges for aquaculture adaptation under climate change: literature review. En: Soto and García -Sampaio (eds) *Aquaculture Adaptation Framework for Climate Change (Aqua-Adapt) – A tool to support the development and implementation of strategies to improve aquaculture's resilience to climate change*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Papers, pp. 1-26, No. 739. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cd6476en>
- Soto, D, Chávez, C, Dresdner, J. 2025a. An Aquaculture Adaptation Framework (Aqua-Adapt) to assess strategies for adapting aquaculture to climate change. En: Soto and García -Sampaio (eds) *Aquaculture Adaptation Framework for Climate Change (Aqua-Adapt) – A tool to support the development and implementation of strategies to improve aquaculture's resilience to climate change*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Papers, pp. 27-56, No. 739. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cd6476en>
- Soto, D, Chávez, C, Dresdner, J, León-Muñoz, J, Molinet, C. 2025b. Adaptation options and cost-effectiveness analysis for reducing the risks associated with climate change: two case studies from Chilean aquaculture. En: Soto and García Sampaio (eds); *Aquaculture Adaptation Framework for Climate Change (Aqua-Adapt): A tool to support the development and implementation of strategies to improve aquaculture's resilience to climate change*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Papers, pp. 57-83, No. 739. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cd6476en>
- Shovon, MAC, Mostafiz, RB, Al Assi, A, *et al.* 2025. Hydroclimatic extremes and aquaculture: a review of impact and response strategies. *Aquacult Int.* 33, 439. <https://doi.org/10.1007/s10499-025-02108-3>

Fagos, profagos y defensas bacterianas: Nuevas claves para enfrentar la septicemia rickettsial del salmón (SRS) y la tenacibaculosis en salmonicultura



Jaime Romero^{1*}; María Elena Linqueo²

¹ Universidad de Chile, INTA. jromero@inta.uchile.cl

² Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Financiamiento: Fondecyt Exploración 13240071, ANID, Chile.

Las enfermedades bacterianas continúan siendo uno de los principales desafíos sanitarios de la salmonicultura moderna. Patógenos como *Piscirickettsia salmonis*, agente causal de la septicemia rickettsial del salmón (SRS), y especies del género *Tenacibaculum*, responsables de la tenacibaculosis, generan altas mortalidades, pérdidas económicas significativas y una fuerte dependencia del uso de antibióticos.

Los bacteriófagos, o fagos, son virus que infectan exclusivamente bacterias y representan los organismos biológicos más abundantes del planeta. En ambientes marinos alcanzan concentraciones cercanas a 10^7 partículas por mililitro de agua y juegan un rol central en la regulación de poblaciones bacterianas. Pueden seguir un ciclo lítico, donde destruyen rápidamente a la bacteria hospedera, o un ciclo lisogénico, integrándose como profagos en el genoma bacteriano (Fig.1).

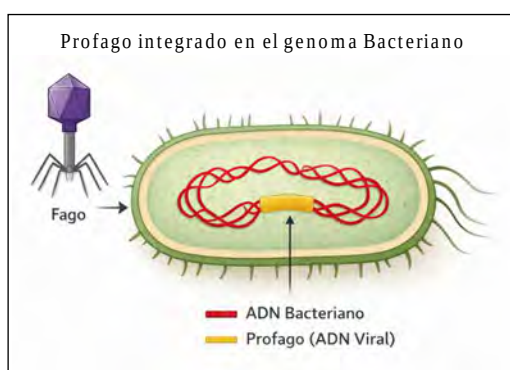


Figura 1: La imagen representa la integración del ADN de un bacteriófago en el cromosoma bacteriano, formando un profago.

En *Piscirickettsia salmonis*, análisis genómicos de múltiples cepas revelan que aproximadamente el 70% contiene regiones de profagos en su genoma, mientras que más del 75% de sus plásmidos albergan uno o más profagos. En total se han identificado cientos de regiones profágicas, muchas asociadas a genes de transposición y proteínas estructurales de fagos, evidenciando una intensa historia evolutiva de interacción fago-bacteria.

En contraste, solo una fracción menor de los genomas de *Tenacibaculum* analizados contiene profagos, concentrados principalmente en *Tenacibaculum maritimum*, especie clave en brotes de tenacibaculosis. Entre estos profagos se han identificado endolisinas con dominios CHAP, enzimas capaces de degradar la pared celular bacteriana y con alto potencial como antimicrobianos de precisión.

Las bacterias han desarrollado sofisticados sistemas antifago. En *P. salmonis* se detectan sistemas como dGTPasas, presentes en prácticamente todas las cepas analizadas, que bloquean la replicación viral; sistemas abortivos como AbiD y MazEF, que inducen la muerte celular para frenar la propagación del fago; y sistemas de restricción-modificación. En *T. maritimum* también se identifican sistemas CRISPR-Cas, reforzando la idea de una presión fágica histórica intensa (fig.2).

Este conocimiento tiene implicancias prácticas directas. Ensayos experimentales con fagos y endolisinas han demostrado reducciones de entre 3 y 5 log10 en recuentos bacterianos tras tratamientos de solo 20 minutos, sin afectar significativamente la microbiota beneficiosa asociada a larvas y alimentos vivos. Estos resultados abren oportunidades concretas para reducir el uso de antibióticos en etapas críticas del cultivo.

Desde una perspectiva comparativa, los resultados obtenidos en *Piscirickettsia salmonis* y *Tenacibaculum spp.* revelan patrones contrastantes pero complementarios en la interacción fago-bacteria, con implicancias directas para el desarrollo de estrategias sanitarias en acuicultura. En *P. salmonis*, agente causal de la septicemia rickettsial del salmón (SRS), la elevada frecuencia de profagos a nivel cromosomal y plasmidial, junto con la presencia generalizada de sistemas antifago como dGTPasas, Abi y sistemas toxina-antitoxina, evidencia una intensa coevolución con bacteriófagos. Este escenario es particularmente relevante en SRS, donde las vacunas muestran una eficacia limitada en condiciones de campo y el uso de antibióticos es ineludible. En este contexto, los fagos y sus derivados emergen como una alternativa innovadora, siempre que se comprendan y consideren los mecanismos de evasión y defensa antifago que pueden limitar su acción, permitiendo así diseñar terapias más robustas, específicas y racionales.

En contraste, en *Tenacibaculum*, especialmente en *T. maritimum*, la menor abundancia de profagos se ve compensada por la identificación de regiones profágicas intactas que codifican endolisinas con dominios catalíticos tipo CHAP. Estas enzimas presentan compatibilidad estructural con dominios líticos funcionales conocidos, posicionándolas como candidatas promisorias para el desarrollo de antimicrobianos de precisión. En conjunto, estos hallazgos refuerzan el potencial de fagos y enzimas fágicas como alternativas sostenibles a los antibióticos y como herramientas clave para un manejo sanitario más eficaz y ambientalmente responsable en salmonicultura.

En conclusión, fagos, profagos y sistemas antifago son componentes centrales en la biología de *Piscirickettsia salmonis* y *Tenacibaculum spp.* Integrar este conocimiento en la salmonicultura permitirá avanzar hacia estrategias sanitarias más sostenibles, precisas y alineadas con la reducción del uso de antimicrobianos.

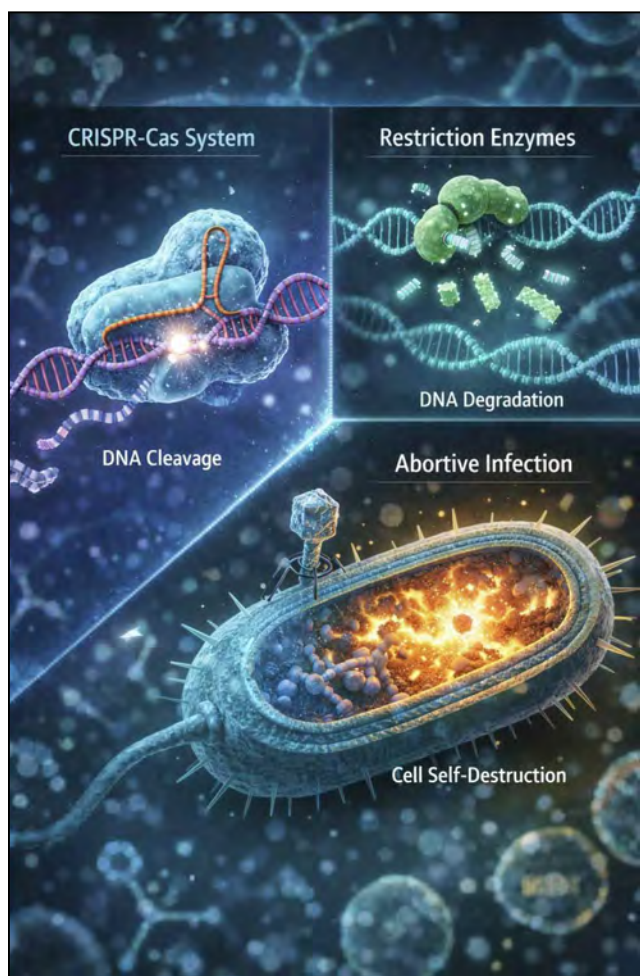
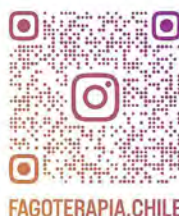


Figura 2: La ilustración muestra distintos sistemas antifago que permiten a las bacterias detectar y neutralizar infecciones virales. Entre ellos se incluyen el sistema CRISPR-Cas, que reconoce y corta específicamente el ADN del fago; las enzimas de restricción, que degradan ADN viral no protegido; y los mecanismos de infección abortiva, en los que la célula infectada activa procesos de autodestrucción para impedir la propagación del fago en la población bacteriana. Estos sistemas conforman una verdadera "inmunidad bacteriana" y desempeñan un rol clave en la dinámica evolutiva entre bacterias y fagos.

REFERENCIAS

Ramírez, C.; Romero, J. *Unveiling Hidden Allies: In Silico Discovery of Prophages in Tenacibaculum Species*. Antibiotics 2024, 13, 1184. <https://doi.org/10.3390/antibiotics13121184>.

Ramírez, C.; Romero, J. *Know Your Enemy: Piscirickettsia salmonis and Phage Interactions Using an In Silico Perspective*. Antibiotics 2025, 14, 558. <https://doi.org/10.3390/antibiotics14060558>.



Web <https://www.fagoterapia.cl/>

Instagram [fagoterapia.chile](https://www.instagram.com/fagoterapia.chile)

Visítanos en Aquasur stand: J - 41

FAGOS Y LISINAS COMO HERRAMIENTAS DE PRECISIÓN PARA UNA ACUICULTURA SOSTENIBLE



Jaime Romero^{1*}, Johanna López-Polo¹, Jorge Farías², Jennie Risopatrón¹, Rodrigo Rojas³, Claudio Miranda³

¹ Universidad de Chile, INTA. jromero@inta.uchile.cl

² Universidad de la Frontera

³ Universidad Católica del Norte

Financiamiento: Anillo Tecnológico ACT240045, ANID, Chile.

Las enfermedades bacterianas continúan siendo uno de los principales desafíos para la sostenibilidad de la acuicultura moderna, especialmente durante las etapas tempranas del cultivo. En sistemas intensivos, el control de patógenos como especies del género *Vibrio* y *Piscirickettsia salmonis* ha dependido históricamente del uso de antibióticos. Sin embargo, esta estrategia presenta limitaciones bien documentadas, incluyendo la selección de bacterias resistentes, la alteración de la microbiota asociada a peces y al ambiente, y crecientes restricciones regulatorias (Romero et al., 2024). En este escenario, los bacteriófagos y las enzimas líticas derivadas de fagos (lisinas) emergen como alternativas biotecnológicas de alta precisión.

BACTERIÓFAGOS: CONTROL DIRIGIDO DE BACTERIAS PATÓGENAS

Los bacteriófagos, o fagos, son virus que infectan exclusivamente bacterias y están presentes de forma natural en los ecosistemas acuáticos. Su alta especificidad por el hospedero bacteriano permite reducir patógenos concretos sin afectar de manera indiscriminada al resto de la comunidad microbiana, a diferencia de los antibióticos de amplio espectro (Romero et al., 2024). En ensayos experimentales realizados en sistemas acuícolas, la aplicación de fagos líticos específicos permitió reducir significativamente la carga de *Vibrio* spp. En experimentos controlados, se observaron reducciones de entre 2 y 3 unidades logarítmicas (log₁₀ UFC/mL) tras exposiciones breves de aproximadamente 20 minutos, tanto en agua de cultivo como en organismos intermediarios como rotíferos. Estas reducciones rápidas son compatibles con los tiempos operacionales de hatcheries y demuestran la eficiencia de los fagos como herramientas de control inmediato (Romero et al., 2024).

LISINAS: ENZIMAS LÍTICAS COMO ANTIMICROBIANOS DE NUEVA GENERACIÓN

Las lisinas son enzimas producidas por bacteriófagos durante la fase final de su ciclo replicativo y son responsables de degradar la pared celular bacteriana. Cuando se utilizan como proteínas recombinantes purificadas, permiten un control antimicrobiano directo, rápido y altamente específico, sin los riesgos asociados a la liberación de material genético viral al ambiente (Romero et al., 2024).

En estudios recientes, el tratamiento con lisinas durante 20 minutos generó reducciones de *Vibrio* spp. comparables o superiores a las obtenidas con fagos completos. En rotíferos y larvas de peces, se registraron disminuciones de hasta 3 log₁₀ en los recuentos bacterianos viables, confirmando una acción lítica eficiente incluso en matrices biológicas complejas (Romero et al., 2026).

IMPACTO SOBRE LA MICROBIOTA: EVIDENCIA CUANTITATIVA

El análisis de comunidades microbianas mediante secuenciación del gen 16S rRNA mostró que la aplicación de fagos o lisinas no provocó pérdidas significativas de diversidad alfa (índices de Shannon y Chao1) en agua, rotíferos ni larvas (Romero et al., 2026).

CONCLUSIONES

Los bacteriófagos y las lisinas derivadas de fagos pueden reducir patógenos relevantes en acuicultura de forma rápida (~20 minutos) y cuantificable (>2 log₁₀), sin disrupciones amplias de la microbiota, posicionándose como herramientas clave para estrategias sanitarias sostenibles (Fig.1).

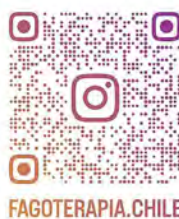


Figura 1: Esquema conceptual del uso de bacteriófagos y lisinas derivadas de fagos en acuicultura como herramientas de control sanitario. La figura ilustra cómo estas tecnologías permiten una reducción rápida y específica de bacterias patógenas, alcanzando disminuciones de >2 log₁₀ (UFC) en aproximadamente 20 minutos, sin afectar de manera significativa a los organismos cultivados ni a la microbiota beneficiosa. Su aplicación se proyecta como una estrategia sanitaria sostenible para sistemas acuícolas, en particular en etapas tempranas del cultivo.

REFERENCIAS

Romero, J.; Blas-Chumacero, S.; Urzúa, V.; Villasante, A.; Opazo, R.; Gajardo, F.; Miranda, C.D.; Rojas, R. Lysin and Lytic Phages Reduce Vibrio Counts in Live Feed and Fish Larvae. *Microorganisms* 2024, 12, 904. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12050904>

Romero, J., et al (2026). Examining the Effects: Lack of Impact by Endolysin and Phage Treatment on Rotifer and Larvae Microbiota. Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202601.1905.v1>



Web <https://www.fagoterapia.cl/>

Instagram [fagoterapia.chile](https://www.instagram.com/fagoterapia.chile)

Visítanos en Aquasur stand: J - 41

UNIVERSIDAD
DE CHILEPONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSOUniversidad
Católica del Norte

DOCTORADO EN ACUICULTURA

El Doctorado en Acuicultura es un programa de con 20 años de historia manteniendo un alto nivel académico, dictado en forma conjunta por la Católica del Norte, la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y la Universidad Católica del Norte. Su objetivo es formar investigadores e investigadoras capaces de generar conocimiento científico aplicado a los principales desafíos del sector acuícola.

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Fisiología y Nutrición aplicada a la Acuicultura

Genética y Biotecnología aplicada a la Acuicultura

Patología e Inmunología aplicada a la Acuicultura

Sostenibilidad de la Acuicultura

CONTACTOS


<https://doctoradoenacuicultura.cl/>

postgrado@inta.uchile.cl


2 2978 1451 / 229781596



Escanea el Código para
Más Información



Almidón funcional de trigo y reología para piensos en Acuicultura San Pablo (ASP)

Functional Wheat Starch and Rheology for Feed in Aquaculture San Pablo (ASP)



Dr. J. Max Blanc ^{1,2}, Jaclyn Duemler ³

¹ Director Técnico. San Pablo Ltda. Área I&D&i

² Profesor e Investigador MNA UACH

³ Profesora. Universidad Austral de Chile e Integrante Team Investigación Área Acuicola UACH.

INTRODUCCION

Es requisito para elaborar piensos para salmones y con tecnología de extrusión (tornillo simple o dobles) utilizar insumos aglutinantes, funcionales. En general, los insumos que son dosificados en acuerdo a las fórmulas que se diseñan y que aportan significativamente a la nutrición, tales como harinas de soya desgrasada, vísceras de aves, harinas de plumas y otros; no aglutinan. Para que las partículas se constituyan en estructuras que respondan adecuadamente a los requisitos nutricionales y aquellos del arte de la alimentación de peces, deben incluir algún insumo que las aglomere sin perjudicar el potencial nutricional. En este escenario es que se enfrentan parámetros necesarios de atender. Por ejemplo; un pienso de alto calibre (12 [mm] diámetro) y alta energía (38-40 [%] lípidos totales) es un desafío interesante toda vez que solicita la contención eficiente de lípidos mediante optimizar la absorción/adsorción de una fase que normalmente a temperatura ambiente y en estaciones distintas al invierno, no alcanza a conseguir el estado pastoso que le impediría escurrir hacia el exterior del pienso, provocando una pérdida económica significativa y eventualmente un impacto ambiental negativo. Estos escurrimientos pueden suceder en los procesos de almacenamiento, transporte terrestre y marítimo, en almacenamiento interior de silos en pontones de alimentación

INTRODUCTION

Manufacturing salmon feed via extrusion technology (using single or twin screws) requires the incorporation of functional, binding ingredients. Generally, the ingredients included for nutritional value, such as defatted soybean meal, poultry viscera, and feather meal, do not possess binding properties. To ensure the particles form structures that adequately meet both nutritional requirements, the formula must include an ingredient that agglomerates them without compromising the nutritional potential. This necessity establishes the critical manufacturing parameters that must be addressed. For example, producing a feed with a high caliber (12 mm diameter) and high energy content (38-40 % total lipids) presents a significant challenge. It demands the efficient containment of lipids by optimizing the absorption/adsorption of a phase that, normally at room temperature and outside of the winter season, does not achieve the paste-like state that would prevent it from seeping out of the feed pellet. This seepage results in significant economic loss and potentially negative environmental impacts. Such leakage can occur at multiple points: during storage, land and sea transport, in the internal storage silos on feeding pontoons at farming centers, and within ducts used for pneumatic conveyance (Figure 1) to the culture cages

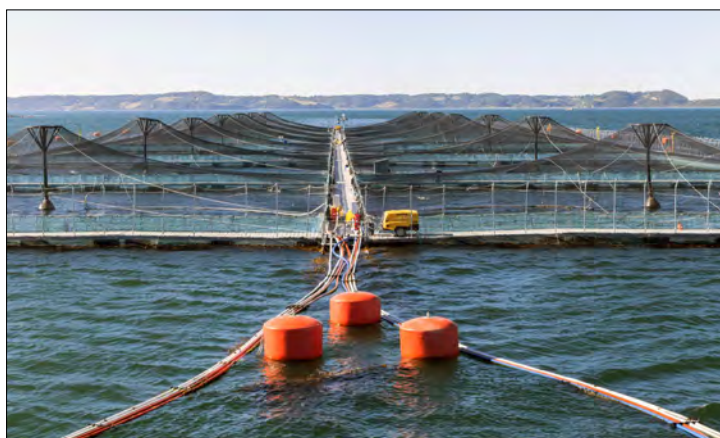


Imagen 1: Distribución de Pienso para salmones. Centro Cultivos Pilpilehue. Salmones Camanchaca S.A. Foto autorizada.

Image 1: Pontoon for Storage and Distribution of Salmon Feed. Pilpilehue Farming Center. Salmones Camanchaca S.A. Authorized photo.

de los centros de cultivos, en ductos que por vía neumática (Figura 1) es conducido el pienso hasta las jaulas de cultivos (Blanc et al., 2022).

Súmese a lo anterior aquellos requisitos estructurales que satisfacen los esfuerzos mecánicos a que son sometidas estos piensos, y que exigen reologías en sus partículas. Un exagerado desempeño de la resistencia mecánica -por ejemplo- impediría que el proceso digestivo del pez funcione adecuadamente, de manera que las bacterias de enzimas no puedan lisar proteínas ni grasas. Al igual que un exceso de aglutinantes, que puede ser correlacionado también al sobre dimensionamiento de la resistencia mecánica.

Alto Calibre y Alta Energía son sinónimos de etapas de engorda de los peces y ello indica que el mayor porcentaje de piensos que se utilizan es en esos periodos. Las características en cada uno de estos procesos ya han sido atendidas y muy especialmente en la distribución en centros de cultivos. Los procesos de formulación y de extrusión (desnaturalización de las proteínas) son sometidos a este dilema.

¿Qué puede solicitar adicionar aglutinantes por sobre aquello nutricionalmente optimo?

Insumos con altos niveles de lípidos presentes. Vísceras de aves, harinas de pluma, reprocesos y otros.

¿Cuánto sería un nivel máximo sobre el cual los insumos que alimentan al proceso de extrusión lesionan las deseadas propiedades reológicas y a su vez no lesionen los perfiles nutricionales, los que nunca alcanzarán sobre el 95 %? La experiencia nos indica valores muy cercanos a 4 [%].

El esfuerzo en la industria salmonera nacional ha sido disminuir al máximo posible la inclusión de almidones (carbohidratos, polisacáridos). Y, la fuente de almidón ha sido -en la práctica- principalmente y por décadas el cereal trigo.

En el uso de este cereal, la historia (1988 a la fecha en Chile) indica que comenzamos con uso de grano cuya molienda se realizaba juntamente con los otros insumos de mayor dosificación (>5 [%] de la formulación).

Para 1998 ya habíamos comenzado a dosificar trigo en grano y sus harinas, evitando la presencia de cuerpos extraños -que aparecían en los trigos- en la formulación. Inmediato posterior al año 1999 y para la elaboración de piensos para peces en agua dulce, primeras alimentaciones desde 0.5 (micro extruido) y hasta 2 [mm] de diámetro solo dosificamos harinas de trigo de origen panadero. En el año 2004 comenzamos a observar los tipos de almidones y sus estructuras internas en el grano y que nos ofrecían las mejores propiedades reológicas. Distinguimos entre amilosa y amilopectinas (Sajilata MG, et al. 2006) y para el 2008 ya teníamos una variedad de trigo (Otto), del mejorador fitogenético Erik von Baer, que nos acompañó hasta 2015.

Para 2016 comenzamos a optimizar combinaciones de trigo y harinas de trigo (Goldring J. 2004) en las formulaciones para avanzar en las

In addition to the previous points, feed must meet the structural requirements to satisfy the mechanical stresses they endure, demanding specific rheologies. An exaggerated mechanical resistance—for example—would negatively impact the fish's digestive process, as the enzyme alternatives could not lyse proteins or fats. The same negative outcome can result from using an excess of binders, which can be correlated with unnecessarily high mechanical resistance.

The terms High Caliber and High Energy are synonymous with the fish fattening stages. This is significant because the highest percentage of feed is used during these crucial growth periods. The specific challenges and characteristics of each of these processes have been previously addressed, particularly concerning distribution in farming centers. Both the formulation and the extrusion processes (denaturation of proteins) are subject to this dilemma of balancing structure, stability and digestibility.

Certain raw materials can negatively impact the required standards for feed formulations when they exceed specific inclusion levels. For example, ingredients with high lipid content—such as poultry viscera, feather meal, fishmeal, and reprocessing (re-work)—hinder the formation of particulate products. The challenge is determining the maximum inclusion level that maintains the desired rheological properties without compromising the nutritional profile (i.e., less than 95% of the total formula). Based on experience in the salmon industry, the cumulative limit for total lipids in the formula is very close to 4%.

The domestic salmon industry has strived to minimize the inclusion of starches (carbohydrates, polysaccharides) as much as possible. For decades, in practice, the primary source of binding starch has been wheat.

Regarding the historical use of this cereal in Chile (from 1988 to the present), early production methods indicate that the whole grain was milled together with other ingredients of greater dosage (those making up over 5 % of the formulation).

In 1998, the industry began dosing wheat grain and its flours to avoid the presence of foreign bodies that contaminated wheat to ensure a purer formulation. Beginning in 1999, only bakery-grade wheat flours were utilized for the production of freshwater fish feed (early feedings from 0.5 (micro-extruded) to 2 mm in diameter). In 2004, formulators began examining the types of starches and their internal structures within the grain, seeking those that offered the best rheological properties. Distinctions were made between amylose and amylopectin (Sajilata MG, et al., 2006) and by 2008, a specific wheat variety (Otto), developed by the phyto-genetic breeder Erik von Baer, was adopted and used until 2015.

Beginning in 2016, combinations of wheat and wheat flours were optimized in the formulations (Goldring J., 2004) to improve the rheological properties when the lipid level in the feed reached thresholds of 37 – 38 %. Later in 2016, the focus narrowed to long,

propiedades reológicas cuando el nivel de lípidos en los piensos alcanzó umbrales 37 - 38 [%]. Luego en 2016 hicimos foco en amilopectinas de larga y resistente cadena para fortalecer la reología presionados por la alta expansión que exigían los altos niveles de lípidos totales. El mercado de la industria nos dirigió a que la fisiología de los peces debía quemar preferentemente lípidos y reservar aminoácidos para la conversión a filete. En tanto y en general, los insumos proteínicos subieron de precios y los que ofrecían mayores concentraciones de aminoácidos lo hicieron con mayor intensidad. Para 2018 en adelante surgió la necesidad de crear espacios en las formulaciones para reconsiderar el uso de insumos proteínicos de menor concentración que nos evitara el uso de aminoácidos o sustitutos exageradamente cotizados y de alto coste. La mirada se volcó en la dirección de una selección rigurosa (Villarroel P., et al. 2018) de almidones de trigos que fueran acompañados de bajos contenidos de gluten húmedo.

Este artículo resume lo que molino ASP ha generado para la industria y ha sido posible porque esta empresa nació para fortalecer -exclusivamente- a la industria acuícola y lo ha hecho desde 1998 a petición de la empresa de entonces; Alitec Ltda.

Este artículo/resumen responde a ¿Cómo podemos hacer mayor "espacio" en las formulaciones? ¿Cómo podemos conseguir reologías para piensos de Alto Calibre y Alta Energía? ¿Como cuantificar? ¿Es inteligente abandonar gradualmente los trigos y terminar dosificando solo harinas para uso acuícola? ¿Qué es una harina de trigo funcional, para uso como ligante en extrusión? ¿Cómo minimizar el uso de almidones para evitar el efecto de obstrucción física y bioquímica en el rol que tienen las enzimas (Goldring J., 2004), preferentemente las proteasas?

METODOLOGIA

Para caracterizar las harinas integrales (contienen toda la fibra del grano y humedad 13.9 - 14.3 [%]) obtenidas luego del proceso de molienda con molino de martillos utilizando malla con perforaciones de 1 [mm] de diámetro y velocidad de rotación de 3200 [rpm], desde tres variedades de trigos nacionales cosecha 2024, se obtuvieron sus fracciones granulométricas [%] mediante el uso de rotámetro Siebtechnik S 61320 operado con tiempo residencia 5 [min] y cedazos U.S.A. Gilson Company, ING, ASTM E-11 Specification. Analizador de humedad balanza Mettler Toledo modelo HE 53/ 01 (d: 0.001 [g]). Balanza AND EK-60i (d:0.01 [g]). Para analizar viscosidades en las harinas integrales y en harinas de alta viscosidad que empresa ASP oferta al mercado acuícola: Balanza Analítica AND HR-120 S 12326158 (d:0.0001 [g]). Mediciones de viscosidad RVA (Rapid Visco Analyzer) Perten Instruments 4500 S2204723-45A (d: 1[cP] utilizado en Estándar 1. Mediciones de parámetros reológicos en extrusos de producto terminado TVT 6700 Perten Instruments*. Tratamientos de Estadística: Análisis de las Distribuciones de Frecuencias de los resultados (pruebas KS, D'Agostino y Shapiro-Wilk) determinaron aplicar Estadística No Paramétrica en tanto no todas las poblaciones de extrusos en las muestras arrojaron perfiles de Distribución de Frecuencias del tipo Gaussiano. Por lo anterior, se aplicaron pruebas estadísticas de comparación No Paramétricas

resistant chain amylopectins to strengthen rheology, due to the high expansion required by high total lipid levels. Market trends indicated that fish physiology should preferentially burn lipids for energy, reserving amino acids for fillet growth. As protein ingredients, especially those with high amino acid concentrations, rose in price, the industry faced pressure from 2018 onwards to create space in the formulations. This required reconsidering lower-concentration protein ingredients, allowing the industry to avoid overly priced and high-cost amino acids or substitutes. Consequently, the focus shifted toward a rigorous selection of wheat starches (Villarroel P. et al., 2018) that were accompanied by low contents of wet gluten.

This article summarizes the advancements generated by Molino ASP for the aquaculture industry. This was possible because the company was established in 1998 exclusively to strengthen the aquaculture industry, initially at the request of Alitec Ltda.

This article addresses key challenges central to modern high-performance aquaculture feed formulation, specifically focusing on the following questions: How can we create more "space" in the formulations? How can we achieve optimal rheological properties essential for producing High Caliber and High Energy feeds? How can we quantify this? Is it strategically beneficial to gradually phase out the use of whole wheat in favor of specialized wheat flours specifically formulated for aquaculture applications? What defines a functional wheat flour designed to act as an effective binder in the extrusion process? How can we minimize the inclusion of starches to prevent the observed physical and biochemical obstruction effect (Goldring J. 2004) on digestive enzymes, particularly proteases?

METHODOLOGY

The objective was to characterize whole grain flours derived from three varieties of national wheat harvested in 2024. These flours, which contained 13.9 to 14.3% moisture and the grain's full fiber content, were obtained via a hammer milling process utilizing a screen with 1 mm diameter perforations and a 3200 rpm rotation speed. The resulting flours were analyzed to determine their particle size fractions (%) using a Siebtechnik S 61320 rotameter (residence time: 5 min), along with ASTM E-11 Specification sieves (U.S.A. Gilson Company, ING). Additionally, a Mettler Toledo moisture analyzer balance (model HE 53/ 01 (d: 0.001 g) and an AND EK-60i balance (d:0.01 g) were used for supporting measurements. For the analysis of viscosity in both the whole grain flours and the high-viscosity flours offered by the ASP company to the aquaculture market, an AND HR-120 S 12326158 analytical balance (d:0.0001 g) was used, and Rapid Visco Analyzer (RVA) viscosity measurements were performed using a Perten Instruments 4500 S2204723-45A (d: 1 cP utilized in Standard 1), in addition to measuring rheological parameters in finished product extrudates with a Perten Instruments TVT 6700*. Finally, regarding statistical treatment, the Frequency Distribution Analysis of the results (via KS, D'Agostino, and Shapiro-Wilk tests) determined the application of Non-Parametric Statistics, given that not all extrudate populations in the samples yielded

Mann-Whitney No Pareadas entre Tratamientos y Controles a diferentes velocidades y calibres (nivel de confianza > 95%, $\alpha = 0,05$) y pruebas de correlaciones No Paramétricas de Spearman.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los trigos están constituidos aproximadamente de 20 [%] de fibra celulósica (afrecho y harinillas) que reduce drásticamente el valor del parámetro Viscosidad, variable de proceso que Alitec Ltda. desarrolló (1998) para cuantificar las calidades y los efectos reológicos en productos extruidos en unidades de tornillo simple (Sprout Matador-Dinamarca) y doble tornillo (Bühler- Suiza).

Tabla 1 muestra los efectos que la celulosa produce en la funcionalidad de una harina integral de trigo tal y como la muelen los molinos de martillos en la industria de elaboración de piensos.

La resistencia a la digestión de los almidones es atribuida principalmente a las estructuras físicas determinadas principalmente por el mayor contenido de amilosa (lineal) constituida por una formación más compacta y que obstruye el proceso de hidrólisis enzimática en comparación a amilopectina (Lehmann U. 2007). Las vías de síntesis de amilosa y amilopectina son relativamente independientes de modo que no sería posible asegurar la proporción entre ellas previo a las cosechas del cereal (Guan-King Chen et al., 2016). Otro aspecto de resistencia a la digestibilidad es el aumento de la densidad de ramas de polisacáridos. Se hace necesario crear una nueva unidad de medida para, a partir de medir viscosidad -unidad intensiva- en harinas, generar una unidad extensiva que permita diseñar las dosificaciones de harinas de

Tabla 1: Rejection % in sieves and particles smaller than 125 microns in size. Standard 1 Viscosity values cP measured with RVA equipment.

Substrate	% Rejection 400 μ	% Rejection 212 μ	% Rejection 125 μ	< 125 μ	Viscosity- whole grain cP	Viscosity- fiber-free flour cP
Wheat A	33.2	14.7	16.5	35.5	560 ***	2050
Wheat B	31.1	15.2	17.1	36.4	567	2038
Wheat C	29.6	16.3	17.4	35.9	700	2120

Nota: La suma de las fracciones granulométricas de cada Trigo asumen las mermas normales en este tipo de análisis y no cierran exactamente en 100 %. Fuente: Laboratorio Molino San Pablo.

Gaussian Frequency Distribution profiles. Consequently, Non-Parametric Mann-Whitney U Tests (Unpaired) were applied for comparison between Treatments and Controls at different speeds and calibres (confidence level > 95%, $\alpha = 0.05$), along with Non-Parametric Spearman's Rank Correlation tests.

RESULTS AND DISCUSSION

Wheats are constituted by approximately 20 % of cellulosic fiber (bran and middlings) which drastically reduces the value of the Viscosity parameter. Viscosity is a process variable that Alitec Ltda. developed in 1998 to quantify the qualities and rheological effects in products extruded in single-screw (Sprout Matador-Denmark) and twin-screw (Bühler- Switzerland) units.

Table 1 shows the effects that cellulose produces on the functionality of a whole wheat flour such as the one milled by hammer mills in the feed production industry.

Tabla 1: Rejection % in sieves and particles smaller than 125 microns in size. Standard 1 Viscosity values cP measured with RVA equipment.

Substrate	% Rejection 400 μ	% Rejection 212 μ	% Rejection 125 μ	< 125 μ	Viscosity- whole grain cP	Viscosity- fiber-free flour cP
Wheat A	33.2	14.7	16.5	35.5	560 ***	2050
Wheat B	31.1	15.2	17.1	36.4	567	2038
Wheat C	29.6	16.3	17.4	35.9	700	2120

Note: The sum of the particle size fractions of each Wheat accounts for normal losses in this type of analysis and does not add up to exactly 100%. Source: Molino San Pablo Laboratory.

The resistance of starches to digestion is mainly attributed to their physical structure, primarily determined by the higher content of amylose (linear), which is constituted by a more compact formation that obstructs the enzymatic hydrolysis process compared to amylopectin (Lehmann U. 2007).

The synthesis pathways of amylose and amylopectin are relatively independent, so it is not possible to ensure their proportions prior to the cereal harvests (Guan-King Chen et al., 2016). The challenge of digestibility is compounded by the increase in the density of polysaccharide branches. Therefore, to properly design the dosages of wheat flours based on their binding functionality, it was necessary to create a new unit of measurement. This new unit converts the

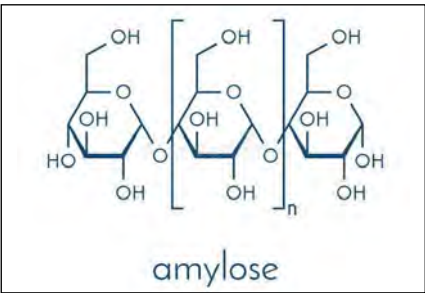


Figura 2: Molecular structure (linear polymer) of Wheat Amylose. Molecular Size: 1,000,000 Dalton. Percentage in Wheat starches: 25 %. Note: Daltons express the mass of molecules. 1Da = 1/12 the mass of a carbon-12 atom.

Nota: 1 Dalton = mide masa de moléculas. 1 [Da] = 1/12 la masa de un átomo de carbono-12.

Figure 2: Molecular structure (linear polymer) of Wheat Amylose. Molecular Size: 1,000,000 Dalton. Percentage in Wheat starches: 25 %. Note: Daltons express the mass of molecules. 1Da = 1/12 the mass of a carbon-12 atom.

Note: Daltons express the mass of molecules. 1Da = 1/12 the mass of a carbon-12 atom.

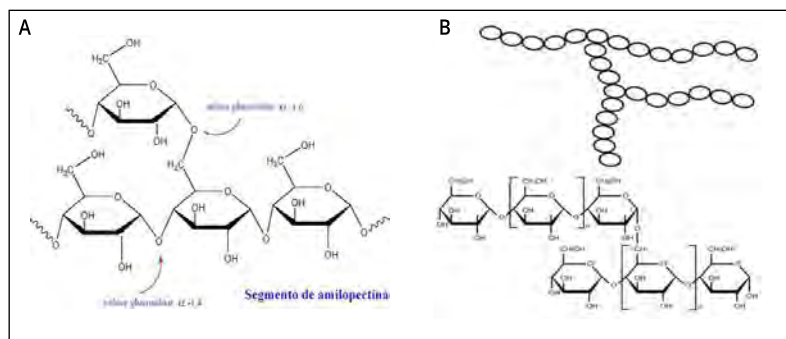


Imagen 3a y 3b: Estructura molecular de Amilopectina de Trigo. Tamaño molecular: 200.000.000 [Dalton]
Porcentaje en almidones de Trigo: 75 [%]

Imagen 3a y 3b: Molecular structure of Wheat Amylopectin. Molecular Size: 200.000.000 Dalton.
Percentage in Wheat starches: 75 %.

trigo para la funcionalidad aglutinante. Este artículo hace debutar en la industria acuícola la unidad [kg cP], que es el producto de multiplicar la viscosidad de una harina integral de trigo o de una harina de Alta Viscosidad del tipo ASP2000 de molino San Pablo.

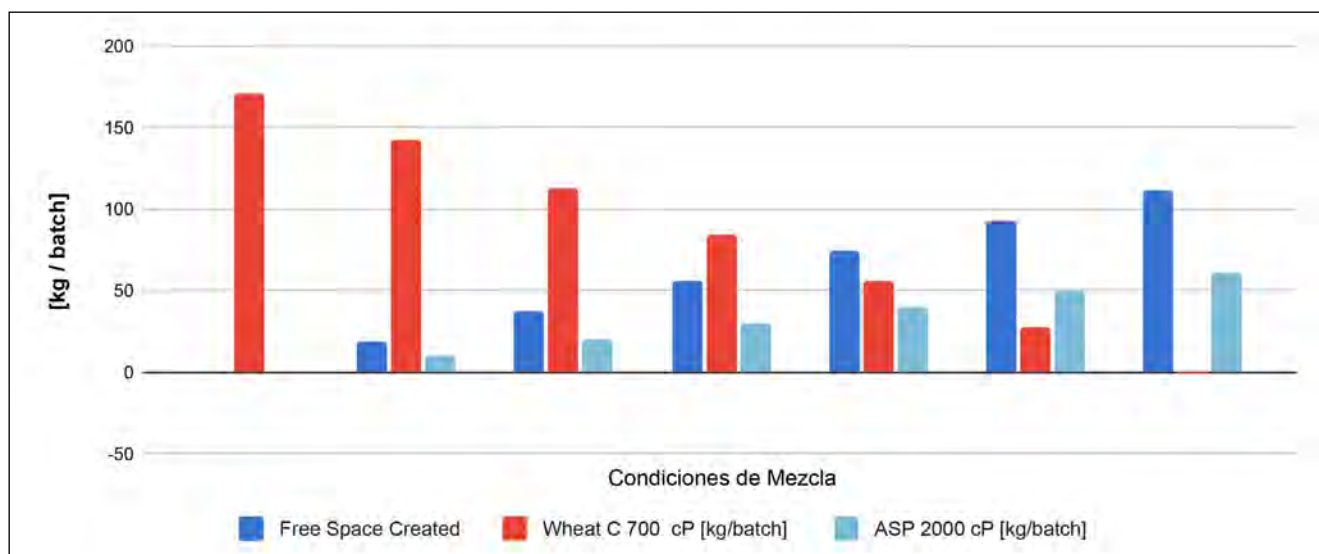
Ejemplo de aplicación: Es requerida para una dieta A -formulación- un valor definido de la viscosidad por los procesos de una factoría de elaboración de piensos, equivalente a 119 000 [kg cP] en el aglutinante, y está utilizando solo Trigo C como gelificante, con viscosidad (en su formato “integral” conseguida en molino de martillos) con viscosidad de 700 [cP] *** (ver Tabla 1), para un batch de 1 000 [kg] de fórmula habría de utilizar 170 [kg] de Trigo C, el trigo aportará (700 [cP] x 170 [kg]) 119 000 [kg cP] y satisface el requisito aglutinante.

Pero; se ocupó 17 [%] de fórmula o 170 [kg] en el Espacio Fórmula. Eso puede ser un problema comercial, operacional y nutricional. Analizar Figura 5 para visibilizar en la Gráfica la posibilidad de sostener el requisito Fórmula A de 119 000 [kg cP]; realizando mezclas de Trigo (en este ejercicio Trigo C) y Harina de trigo ASP2000 cP, a objeto optimizar aquellos parámetros especiales que solicitan los clientes. Así, si es necesario hacer Espacio Fórmula en 1000 [kg]

measurement of viscosity—an intensive unit—into an extensive unit. This article introduces the unit kilogram centipoise [kg cP] to the aquaculture industry, which is the product of multiplying the viscosity of a whole wheat flour or an ASP2000-type High Viscosity flour from Molino San Pablo.

Application Example: A defined viscosity value is required for Diet A formulation, based on the specific processes of a feed manufacturing plant, equivalent to 119,000 [kg cP] in the binder component. If the formulation exclusively uses Wheat C as a gelling agent, and this viscosity (in its “whole grain” format obtained via hammer milling) has a viscosity of 700 cP*** (see Table 1), then a 1,000 kg batch of the formula would need to utilize 170 kg of Wheat C. This inclusion rate ensures the wheat contributes the necessary (700 cP x 170 kg) = 119,000 [kg cP], thereby satisfying the established binding requirement.

The initial strategy, requiring 17 % of the formula or 170 kg to be dedicated to the binder (Wheat C), excessively consumes Formula Space, creating potential commercial, operational, and nutritional constraints. To solve this, Figure 5 illustrates how to maintain the critical 119,000 [kg cP] binding requirement (for Formula A) by

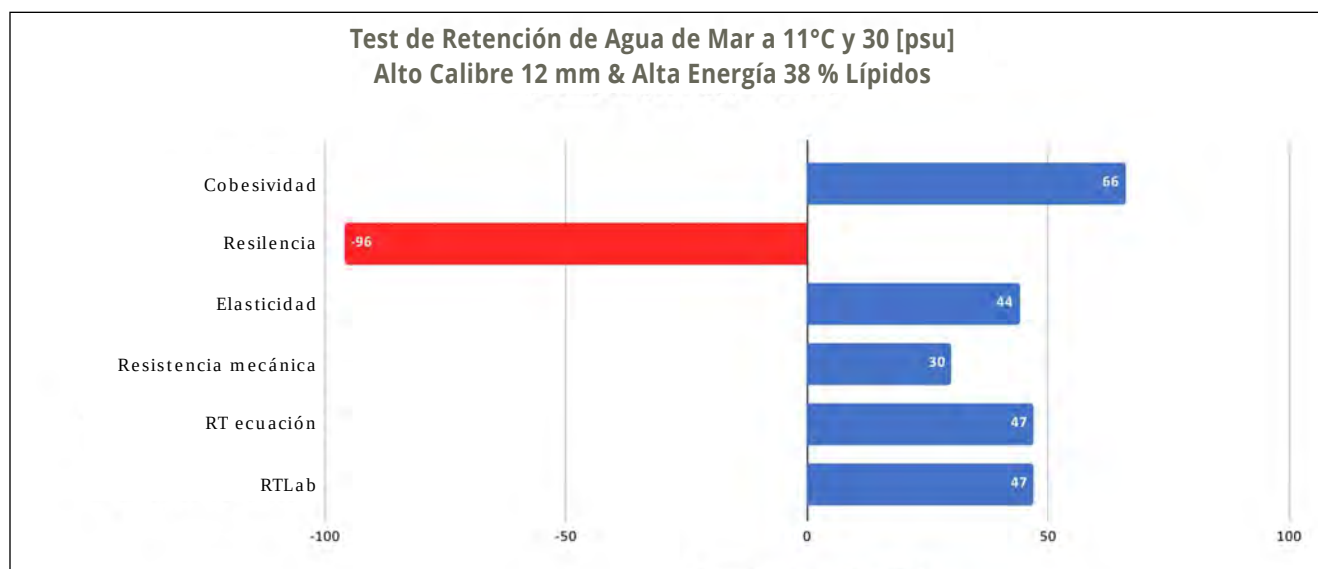


Fuente: Área I&D&I San Pablo. 2025.

Source: R&D&I San Pablo Area. 2025.

Figura 4: Carga de Viscosidad [kg cP]
Trigo C [700 cP] + ASP 2000
Target Fórmula A: 119 000 [kg cP] Batch: 1000 [kg Producto Extruido]

Figure 4: Viscosity Load [kg cP]
Wheat C [700 cP] + ASP 2000
Target Formula A: 119 000 [kg cP] Batch: 1000 [kg Extruder Product]



Fuente: Área I&D&I San Pablo. 2025.

Source: R&D&I San Pablo Area. 2025.

Figura 5: Test de Retención en agua de mar para fórmula Alto Calibre y Alta Energía. Relata el desempeño de la reología de un pienso obtenido por extrusión. Trigo C 3 %* / Harina de Trigo C 10 %*. Producto alcanzó 47 [%] en Índice RT. *: Ref. Total Fórmula.

Figure 5: Retention Test in Seawater for High Caliber and High Energy formula. It relates the rheology performance of a feed obtained by extrusion. Wheat C 3 %* / Wheat Flour C 10 %*. Product reached 47 % in RT Index. *: Ref. Total Formula.

la Gráfica de Figura 4 lleva -ejemplo- al Punto 6 del Eje de Abscisas. Barra azul le entrega 93 [kg/ batch de Espacio Fórmula] cuando usted mezcla 27 [kg de Trigo C (barra roja) y 50 [kg] de ASP2000 (barra celeste). Puede desplazarse por la Gráfica para cuando las condiciones restrictivas son: Trigo molido con todo su contenido de celulosas y leído en unidad RVA para su viscosidad con lectura 700 cP. Uso de ASP2000 y un requisito operacional del proceso de extrusión de 119 000 [kg cP] en su Mix.

Como puede observarse, si el Trigo a ingreso mezcla es de baja calidad y si su producto extruido exige una Carga de Viscosidad alta el escenario puede solicitar observar cómo incrementar la Carga de Viscosidad para no comprometer la calidad de los piensos. Una lectura de viscosidad de Trigos -para efectos de factoría de piensos- medirse en el formato que usa ese insumo: con toda la celulosa contenida porque ese y no una fracción distinta es incluida en el pienso.

Molino ASP dispone a partir de la fecha de publicación del presente Artículo, y para sus clientes; la capacitación necesaria para la utilización de un Modelo de Cálculo, para lo expuesto previo. No podemos evitar hacer la consulta siempre recurrente en los estudiantes de postgrado en Nutrición Acuícola:

Y ... ¿aquello reológico, como se entiende en este contexto? Existen varios parámetros que hacen uso exclusivo de fórmulas especiales y calibres en piensos para salmones. A saber y por ejemplos: alta absorción de lípidos, grados de velocidad de hundimiento para agua dulce o agua mar, grado de digestibilidad, palatabilidad, flotabilidad, resistencia a la disgregación en agua sumergida (coeficiente RT – Retention Test).

substituting some Wheat C with the concentrated binder (ASP2000 cP Wheat Flour) with the aim of optimizing the special parameters requested by customers. Thus, to maximize the gain in Formula Space within the 1000 kg batch, the user is directed to Point 6 on the Abscissa Axis (Figure 4). This point illustrates an optimal mix— 27 kg of Wheat C (red bar) and 50 kg of ASP2000 (light blue bar) — which yields a net gain of 93 kg/ batch of Formula Space (indicated by the blue bar). This entire optimization process is governed by two fixed constraints: the milled wheat must retain all its cellulose and show a baseline RVA viscosity of 700 cP, while the final mix must always meet the extrusion process's operational requirement of 119,000 [kg cP].

As can be observed, if the Wheat in the mix is low quality and the extruded product requires a high Viscosity Load, the situation may necessitate increasing the Viscosity Load so as not to compromise the quality of the feed. For the purpose of feed factories, the viscosity reading of the Wheat must be measured in the exact format that the ingredient is utilized. This means the viscosity must be measured with all the contained cellulose, because that entire fraction- and not a different, cleaner fraction- is what is actually included in the feed.

Molino ASP will provide its customers with the necessary training to use the Calculation Model, starting from the date of publication of this article, covering the content explained previously. Despite the technological advancements discussed, we cannot avoid addressing the question that is always recurrent among postgraduate students in Aquaculture Nutrition:

Este último (RT) parámetro utilizaré en el ejemplo -para esta ocasión- mostrando un resultado intermedio en búsqueda de un RT mayor o igual a 50%. El porcentaje en la unidad se refiere a que proporción de la masa original luego del test de inmersión en agua, es el que resiste a su desensamblaje como partícula luego de un tiempo y a cierta temperatura sumergido y con agitación controlada.

Los resultados en la siguiente Figura 1. Se presentan algunas de las propiedades mecánicas que cuantifican los parámetros para una dieta específica, a objeto lograr controlar el requerimiento de Retención de las partículas de piensos (extrusos) cuando son sumergidas en agua de mar. Los resultados que se muestran fueron obtenidos de ensayos a 35 extrusos por muestra. Muestras de diferentes Lotes: 14. Datos tratados estadísticamente mediante Regresiones Lineales Multivariadas, RLM. Los datos de base obtenidos en unidad TVT. Rango dominio ecuación del RLM para variable Retención= 30-50 [%]. Modelo RLM en que la bondad estadística (R2) del modelo está garantizada dentro del rango definido precedentemente. Exigencia operativa sobre el Modelo.

La Ecuación RLM es:

RT específico= $0,004 \times (\text{Resistencia Mecánica}) + 52 \times (\text{Elasticidad}) - 196 \times (\text{Resiliencia}) + 180 \times (\text{Cohesividad})$.

R2 0.989

La constante de la ecuación anterior -factor de ignorancia- ha sido absorbida por los coeficientes de la Ecuación, posible al tener factor de regresión R² suficientemente alto.

La propiedad mecánica de Resiliencia (capacidad de absorber energía sin manifestar deformación dentro del límite elástico (Merrett, F. 1992) es una y la propiedad que lesiona los valores del parámetro acuícola RT, interpretando esto que la absorción de energía en el test mecánico TVT y que no se manifiesta en deformación plástica, debilita las redes reológicas que mantienen la estructura de los extrusos bajo inmersión en agua de mar 28 000-32 000 [ppm] o 28-32 [psu] grados de salinidad a temperaturas 11°C.

CONCLUSIONES

El nuevo concepto que es propósito fundamental de este artículo, [kg cP], y que lo denominamos Carga de Viscosidad. Se ha diseñado obteniendo el producto matemático entre una Propiedad Intensiva (la Viscosidad [cP]) y una propiedad extensiva como lo es la masa medida en gramos [g]. Para efectos de este artículo se ha utilizado [kg] de modo hacerlo en acuerdo a los órdenes de magnitud con que trabajan las factorías de piensos para salmones. El diseño de este simple modelo para estimar las mezclas de trigo en grano con harina de trigo, ofrece una elevada asertividad estadística para administrar adecuadamente las dosificaciones de estos insumos.

Cada fórmula y calibre requiere de una ecuación como la ilustrada de forma que se constituya una batería de modelos como Formulas y calibres existan en el inventario de factoría. Es evidente que aquellas fórmulas de mayor demanda por el mercado salmonero tendrán las primeras prioridades para su desarrollo. Es sugerido

How is the rheological aspect understood in this context? There are several parameters that are unique to special formulas and calibers in salmon feed. These include high lipid absorption, speed of sinking for fresh or seawater, degree of digestibility, palatability, buoyancy, and resistance to disintegration in submerged water (RT – Retention Test coefficient).

The retention parameter (RT) will be used in this example—which shows an intermediate result in search of an RT greater than or equal to 50%. This percentage quantifies the proportion of the pellet's original mass that remains intact after being subjected to a water immersion test. This test measures the pellet's resistance to breakdown when submerged in water for a specific time, at a certain temperature, and with controlled agitation.

The results shown in Figure 5 illustrate various mechanical properties quantified for a specific diet. The goal is to control the required Water Retention of the extruded feed pellets when they are submerged in seawater. These findings are based on testing 35 extrudates per sample across 14 different production lots. The raw data was analyzed using Multivariate Linear Regression (MLR), with base data measured in TVT units. The MLR model for the Retention variable is valid within the domain range of 30-50 % and has high statistical reliability (R2 =0.989). This high R2 confirms that the model accurately predicts Retention within this critical operational range.

The MLR Equation is:

Specific RT = $0.004 \times (\text{Mechanical Resistance}) + 52 \times (\text{Elasticity}) - 196 \times (\text{Resilience}) + 180 \times (\text{Cohesiveness})$

The constant—ignorance factor—has been absorbed by the coefficients of the Equation, which was possible due to the sufficiently high R² factor.

The mechanical property of Resilience (the capacity to absorb energy without manifesting deformation within the elastic limit) (Merrett, F. 1992) is precisely the property that negatively impacts the aquaculture parameter RT. The interpretation is as follows: energy absorbed in the TVT mechanical test that does not result in plastic deformation weakens the rheological networks that maintain the structure of the extruded pellets when submerged in seawater (with a salinity of 28,000 - 32,000 ppm or 28 - 32 psu at 11°C), parameters that represent typical culture temperature and salinity.

CONCLUSIONS

The core focus of this article is a new concept called Viscosity Load, denoted by the unit kilogram centipoise [kg cP]. This concept is derived from a simple mathematical product: multiplying an Intensive Property (Viscosity cP) by an Extensive Property such as mass measured in grams. For the purposes of this article, kilograms were used to align with the large orders of magnitude commonly handled by salmon feed factories.

The design of this simple model for estimating blends of whole grain wheat with wheat flour offers high statistical reliability (assertiveness) for adequately managing the dosing of these ingredients. Every feed formula and pellet caliber requires its own specific

utilizar no menos de 10 Lotes de producción por Fórmula/Calibre para obtener una adecuada Regresión.

AGRADECIMIENTOS

A San Pablo Ltda. por el financiamiento de esta publicación y su permanente atención a los desafíos que comparte con la salmonicultura nacional. Vitapro Chile, en que se realizaron mediciones de reología y ensayos piscícolas. A Salmones Camanchaca por atendernos en sus instalaciones y colaborar en iniciativas de desarrollo. Especiales agradecimientos a Ingenieros Miguel Galdós y Clark Hamilton; ejecutivos de U.S. Wheat Associates; por colaborar desde 2023 en la gestión de variedades de trigos americanos de alta viscosidad (SW) a la vez que materializados su compromiso con nuestros desafíos. Es destacable que a solicitud del autor de esta publicación se haya incorporado desde 2024 al Reporte de la Calidad de la Cosecha de U.S. Wheat Associates la variable viscosidad medida en unidades internacionales Centi Poise [cP]. Sin la unidad [cP] del Sistema Internacional, no es posible aplicar algebra y resolver ecuaciones coherentes en estos avances tecnológicos que tenemos la responsabilidad de protagonizar, la industria acuícola chilena lo agradece muy especialmente. El contenido de este artículo da cuenta de ello.



Imagen 4: Extrusora (Andritz) elabora piensos para salmones. Gentileza de Vitapro-Chile.

Image 4: Extruder machine (Andritz AG) produces salmon feed. Courtesy of Vitapro-Chile.

equation like the one illustrated so that a range of models is created, corresponding to the formulas and calibers in the factory's inventory. Naturally, those formulas with the highest demand in the salmon market will be the first priority for development. It is suggested that no fewer than 10 production lots per Formula/Caliber be used to obtain an adequate statistical Regression.

ACKNOWLEDGEMENTS

To the company Vitapro Chile where rheology measurements were performed. To Salmones Camanchaca SA who has kindly assisted the author and the USW executives in the initiatives related to developing better starch additives based on wheat flours. Special thanks are extended to the engineers Miguel Galdós and Clark Hamilton, Regional Director and Past Chairman of U.S. Wheat Associates, respectively. They have collaborated actively with our projects since 2023 by providing high-viscosity American wheat varieties. We specifically highlight the adoption of the parameter Viscosity, measured in international units of centipoise (cP) in U.S. Wheat Associates' Annual Reports for American wheat harvests starting in 2024. This change was requested in 2023. Without the cP unit from the International System, it is impossible to apply algebra and solve coherent equations necessary for the technological advancements we are responsible for leading.

REFERENCES

- Blanc et al. 2022. Transporte Neumático de Pienso para Peces en Sistemas de Alimentación de Salmones. Variable: Velocidades de Flujo Turbulento y Calibres. Revista Versión Diferente, Primer Semestre 2022.
- Blanc, J. 2003. Almidones para la Acuicultura. Editorial Puerto de Palos. Ed. 2°. 80 pg. Stgo. Chile.
- Golding J. 2004. Resistant starch: Safe intakes and legal status, J. AOAC Int 2004;87:733-739.
- Guan-King Chen, Jian-Wen Zhou, Yan-Lin-Liu, Xiao-Bing Lu, Cai-Xia Han, Wen-Ying Zhang, Yan-Hao Xu & Yue-Ming Yan., 2016. Biosynthesis and Regulation of Wheat Amylose and Amylopectin from Proteomic and Phosphoproteomic Characterization of Granule-binding Proteins www.nature.com/scientificreports
- Lehmann U., Robin F. Slowly digestible starch and its structure and health implications: a review, Trends Food Sci Technol. 2007; 18:346-355.
- Merrit, F. Manual del Ingeniero Civil. 3ª Ed. McGRAW-Hill. ISBN 968-422-848.
- Sajilata MG et al., 2006. Resistant starch a review. Compr Rev Food Sci F 2006; 5:1-17
- Villarreal P., Gómez C., Vera C., Torres J. 2018. Almidón resistente: Características tecnológicas e intereses fisiológicos. Rev Chil Nutr 2018; 45(3):271-278. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182018000400271>

PROGRAMA TECNOLÓGICO PTEC OSTRA JAPONESA: DESARROLLO Y ESCALAMIENTO SUSTENTABLE DE LA INDUSTRIA DE LA OSTRA JAPONESA



Rodrigo Rojas¹, Gonzalo Álvarez¹, Alex Poblete², Alejandra Vargas² y Lilian Alfaro²

¹ Departamento de Acuicultura, Universidad Católica del Norte.

² Programa PTEC Ostra Japonesa

INTRODUCCIÓN

El cultivo de la ostra japonesa (*Crassostrea gigas*) constituye una alternativa estratégica para la diversificación de la acuicultura chilena, debido a su adaptabilidad ambiental, rápido crecimiento, su alto valor comercial y la demanda sostenida en mercados nacionales e internacionales (FAO, 2022; Botta et al., 2020). Sin embargo, a pesar de contar con más de cuatro décadas de experiencia productiva, el desarrollo de este recurso en Chile ha sido discontinuo y limitado, principalmente por brechas en la producción de semillas, la estandarización de procesos, el control sanitario, transferencia tecnológica y el acceso a mercados (Cárcamo et al., 2022).

En este contexto, el Programa Tecnológico para el desarrollo y escalamiento sustentable del cultivo de la Ostra Japonesa (*Crassostrea gigas*), código 23PTECDA-247634 financiado por CORFO, se implementa como una iniciativa orientada a abordar de manera integrada las brechas productivas, tecnológicas y comerciales que han limitado históricamente el desarrollo de este recurso en Chile. El programa articula investigación aplicada, desarrollo tecnológico, formación de capital humano y transferencia efectiva al sector productivo, con el propósito de generar capacidades instaladas y resultados verificables en los territorios donde se desarrolla la actividad acuícola, abarcando ocho regiones del país.

CONTEXTO NACIONAL DEL CULTIVO DE *CRASSOSTREA GIGAS* Y BRECHAS PRODUCTIVAS

La ostra japonesa constituye el principal recurso ostrícola cultivado a nivel mundial, concentrándose mayormente en países asiáticos y un fuerte posicionamiento en América del Norte y Europa (Botta et al., 2020). En Chile, la especie fue introducida en el año 1978 con fines experimentales, demostrando una adecuada adaptación ambiental y ausencia de comportamiento invasivo en condiciones naturales (Castilla et al., 2005; Moller et al., 2001).

Sin embargo, la producción nacional presentó una tendencia decreciente durante los últimos diez años, alcanzando mínimos históricos asociados al cierre de centros productores de semillas, exigencias sanitarias internacionales, especialmente relacionadas con la detección de Norovirus, y una baja capacidad de escalamiento por parte de los pequeños productores (AQUA, 2017; Cárcamo et al., 2022; SERNAPESCA, 2024).

Entre las principales brechas estructurales identificadas se encuentran:

- Producción nacional de larvas y semillas de calidad estandarizada insuficiente (IFOP, 2023).
- Inexistencia de planteles de reproductores con manejo genético controlado y reducción de endogamia (Guo et al., 2009).
- Inexistencia de monitoreo sanitario que incluya metales pesados y floraciones algales nocivas en zonas potenciales de cultivo (Toyofuku, 2006).
- Transferencia tecnológica escasa hacia APEs, AMERBs y empresas (Cárcamo et al., 2022).
- Poco desarrollo de modelos de negocio y estrategias de comercialización nacional e internacional.

Estas limitaciones han impedido la consolidación de una industria nacional competitiva, pese a contar con ventajas comparativas que presenta el país, como la contra estación respecto del hemisferio norte y el estatus sanitario favorable (IFOP, 2023) y la existencia de capacidades científicas instaladas.

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROGRAMA TECNOLÓGICO (PTEC) OSTRA JAPONESA

El PTEC Ostra Japonesa es ejecutado por la Universidad Católica del Norte, a través del Departamento de Acuicultura de la Facultad de Ciencias del Mar. El Programa cuenta con 3 coejecutores estratégicos, Fundación Chinquihue, Cultivos Nanaku y el Centro de Innovación Acuicola Aquapacífico y los asociados Minera Los

Pelambres y el Sindicato de la Caleta de Pescadores de Cifuncho, Región de Antofagasta.

El objetivo general del Programa es consolidar el desarrollo sustentable y escalamiento productivo y comercial, en la actividad acuícola del recurso Ostra Japonesa (*Crassostrea gigas*), contribuyendo así, a la diversificación de la matriz productiva acuícola nacional.

Los objetivos específicos planteados en el Programa son los siguientes:

- Producir larvas y semillas de ostra japonesa de calidad estandarizada en hatcheries del norte y sur de Chile.
- Definir zonas potenciales de cultivo de la ostra japonesa desde el punto de vista sanitario, metales pesados, Floraciones Algales Nocivas (FANs) y detección de patógenos en semillas y adultos, listados en el Programa de Vigilancia Activa de Moluscos (PVM) y la Organización Mundial de Sanidad Animal (OMSA).
- Realizar una transferencia tecnológica efectiva para la producción de semillas y cultivo de ostra japonesa a APES, AMERBS y Empresas de Cultivo de moluscos, para el escalamiento y masificación de su cultivo.
- Desarrollar e implementar una estrategia para la comercialización de larvas, semillas y adultos de ostra japonesa a nivel nacional e internacional.
- Formar capital humano para el desarrollo de actividades necesarias en cultivo y escalamiento sustentable del recurso.
- Gestionar y administrar correctamente la totalidad del programa y el funcionamiento de su gobernanza.

El programa se estructura en cinco portafolios interrelacionados, con una gobernanza que articula actores públicos, privados y académicos, asegurando coherencia técnica, seguimiento de resultados e impacto territorial.

INNOVACIONES Y RESULTADOS PRELIMINARES

Principales innovaciones tecnológicas desarrolladas

- Acondicionamiento de reproductores
- Hatchery y producción larval
- Producción de semillas estandarizadas
- Centro de Fijación Remota (CFR)
- Microalgas, bioseguridad y control sanitario
- Transferencia tecnológica y formación de capital humano



Figura 1: Semillas de ostra japonesa producida por el Laboratorio Central de Cultivos Marinos de la Universidad Católica del norte bajo el marco del Programa PTEC.

Resultados preliminares En el período comprendido desde diciembre de 2023 a la actualidad el PTEC Ostra Japonesa, se han alcanzado resultados relevantes que evidencian avances concretos en la reducción de brechas históricas asociadas al cultivo de *Magallana gigas* (ostra japonesa) en Chile, particularmente en la producción y abastecimiento de semillas (Figura 1), transferencia tecnológica y articulación territorial. En términos de implementación territorial, el programa ha logrado

consolidar su ejecución en ocho regiones del país, abarcando desde la Región de Tarapacá hasta la Región de Los Lagos. Esta cobertura ha permitido validar tecnologías de producción de semillas, aspectos sanitarios y socio-productivos, fortaleciendo la robustez técnica de las soluciones desarrolladas y su potencial escalamiento a nivel nacional.

En el ámbito productivo - comercial, uno de los hitos más significativos corresponde al inicio de la comercialización de semillas de ostra japonesa producidas bajo estándares definidos

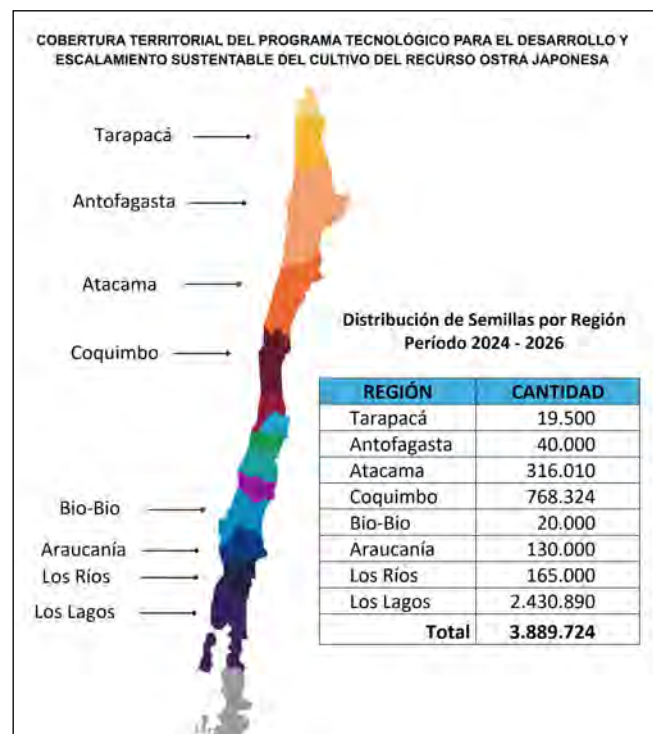


Figura 2: Cantidad de semillas de ostra japonesa entregadas por el Programa PTEC entre 2024 y enero de 2026, por Región.

por el Programa. A enero de 2026, la venta acumulada es cercana a los 4.000.000 de semillas, destinadas a productores de Acuicultura de Pequeña Escala (APE), organizaciones asociadas a Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB) (Figura 2). Este resultado preliminar constituye un avance sustantivo hacia la autonomía nacional en la provisión y abastecimiento de semillas, históricamente identificada como uno de los principales cuellos de botella para el desarrollo del sector ostrícola chileno.

De manera complementaria, el programa ha implementado una estrategia de transferencia tecnológica activa, orientada a la adopción temprana de tecnologías por parte de los usuarios finales. Esta estrategia ha contemplado actividades de capacitación

especializados de la industria alimentaria y acuícola, tales como Food & Service. Estas instancias han permitido difundir los avances tecnológicos del PTEC, fortalecer redes de colaboración y generar condiciones para el desarrollo de estrategias de comercialización a mayor escala en las etapas finales del programa.

TRANSFERENCIA Y TERRITORIALIDAD

La transferencia tecnológica y el enfoque territorial constituyen ejes estructurales del PTEC Ostra Japonesa, al permitir que los avances científicos y tecnológicos generados en el marco del programa se traduzcan en impactos productivos concretos y sostenibles. Desde esa perspectiva, la transferencia no se concibe como un proceso unidireccional, sino como una interacción continua entre el ámbito científico técnico y los actores del ámbito productivo local, lo que ha facilitado la adaptación de las tecnologías a las condiciones ambientales, sanitarias y operativas de cada territorio.

Estrategia de Transferencia Tecnológica:
Actores Clave y Mecanismos de
Implementación

El PTEC ostra japonesa ha desarrollado una estrategia de transferencia tecnológica activa e integral, orientada a la Acuicultura de Pequeña Escala (APE), a las Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB) y a empresas de cultivo cuando se requiera. Dicha estrategia enfatiza en que los conocimientos y tecnologías sean comprendidos y utilizados por los actores locales, a través de la capacitación técnica especializada, acompañamiento productivo continuo y el fortalecimiento de capacidades operativas. Considerando las condiciones ambientales, sanitarias y socioeconómicas

de cada zona, con la finalidad de asegurar una transferencia tecnológica factible, ajustada a cada lugar y con impacto productivo real.

Cobertura Territorial

La dimensión territorial del programa se expresa en su implementación en ocho regiones del país Tarapacá (I), Antofagasta (II), Atacama (III), Coquimbo (IV), Valparaíso (V), Biobío (VIII), Los Ríos (XIV) y Los Lagos (X). Esta amplia cobertura contribuye a descentralizar la innovación productiva y analizar el desempeño productivo de la ostra japonesa en las distintas zonas del país. Esta configuración territorial permite fortalecer nuestras validaciones científicas y elaborar recomendaciones técnicas que realmente respondan a las necesidades de cada región (Figura 3) para la obtención de un producto de calidad para ofrecer al mercado (Figura 4).



Figura 3: Cultivos Cholche de Don Justo García, cultivador con más de 40 años de experiencia en el cultivo de moluscos, quien participa activamente en el Programa PTEC evaluando innovaciones tecnológicas de cultivo.

técnica, acompañamiento productivo y/o validaciones en terreno, permitiendo que productores y usuarios incorporen prácticas técnicas en el manejo inicial de semillas y en etapas de engorda del cultivo de ostra japonesa.

Asimismo, se han desarrollado instancias de formación de capital humano y fortalecimiento de capacidades locales, mediante la realización de talleres y workshops, incluyendo actividades ejecutadas en localidades como Puerto Montt y Castro. Estas acciones han contribuido a fortalecer competencias operativas y técnicas en los territorios, promoviendo una implementación más sostenible y contextualizada del cultivo de ostra japonesa.

Finalmente, el programa ha avanzado en el posicionamiento sectorial y visibilidad comercial, participando en ferias y eventos



Figura 4: Ejemplares de ostra japonesa adultos, en talla comercial, producidos en el Sur de Chile a partir de semillas producidas bajo el marco del Programa PTEC.



Figura 5: Acuipesca Tongoy Mujeres, primera cooperativa de ostreras de Chile, formada en 2019 por 5 mujeres pioneras en la acuicultura sostenible. Esta agrupación participa activamente con el Programa PTEC Ostra Japonesa.

Inclusión Social y Equidad de Género

El PTEC considera la formación de capital humano y transferencia tecnológica como una oportunidad para fortalecer el conocimiento técnico a los cultivadores/as y a las comunidades costeras. Por lo cual, la formación de capital humano es fundamental, ya que promueve la participación de mujeres y jóvenes en todas las etapas del cultivo permitiendo un involucramiento sostenido y mantiene el interés en el desarrollo del cultivo de la ostra. Hoy en día, muchas mujeres, e hijas de pescadores artesanales, participan directamente en las labores diarias de cultivo de la ostra japonesa, tales como conteo de semillas, siembra, desdoble y cosecha; permitiendo continuidad generacional, fortalece el aprendizaje en los territorios y visibiliza el rol clave de las mujeres en la producción acuícola. Así, la equidad de género y la inclusión social se convierten en componentes reales y cotidianos del desarrollo productivo promovido por el programa (Figura 5).

DESAFÍOS Y PROYECCIÓN

Proyección

Durante el período 2026 al 2028 el Programa proyecta consolidar la autonomía productiva, fortalecer la promoción y comercialización del recurso y pretende avanzar hacia modelos de economía circular, incorporando la valorización de subproductos tales como la concha de ostra para la obtención de carbonato de calcio y otros usos.

REFERENCIAS

- AQUA. (2017). *En Chile: La ostra retoma el camino*. <https://www.aqua.cl/reportajes/chile-la-ostra-retoma-camino/>
- Botta, R., Asche, F., Borsum, J. S., & Camp, E. V. (2020). A review of global oyster aquaculture production and consumption. *Marine Policy*, 117, 103952. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103952>
- Cárcamo, C., Díaz, M., & Sobenes, C. (2022). Desarrollo del cultivo de ostras en Chile: desafíos productivos y territoriales. *Revista de Acuicultura y Desarrollo*, 14(2), 45–62.
- Castilla, J. C., Uribe, M., Bahamonde, N., et al. (2005). Marine non-indigenous species in Chile. *Biological Invasions*, 7(2), 213–232.
- FAO. (2022). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022: Hacia la transformación azul*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0461es>
- Guo, X., Wang, Y., Xu, Z., & Yang, H. (2009). Chromosome set manipulation in shellfish. In G. Burnell & G. Allan (Eds.), *New technologies in aquaculture* (pp. 165–190). Woodhead Publishing.
- IFOP. (2023). *Informe de priorización tecnológica para el desarrollo del cultivo de ostra japonesa en Chile*. Instituto de Fomento Pesquero.
- Moller, P., Sánchez, P., & Muñoz-Pedrerros, A. (2001). Cultivo de ostra japonesa (*Crassostrea gigas*) en un humedal estuarino del sur de Chile. *Gestión Ambiental*, 7, 65–78.
- Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (2025). *Informe sectorial de pesca y acuicultura 2025*. Gobierno de Chile. https://www.subpesca.cl/portal/618/articles-124435_documento.pdf
- Toyofuku, H. (2006). Joint FAO/WHO/IOC activities on marine biotoxins. *Marine Pollution Bulletin*, 52(12), 1735–1745.

Investigación UACH con impacto en el territorio



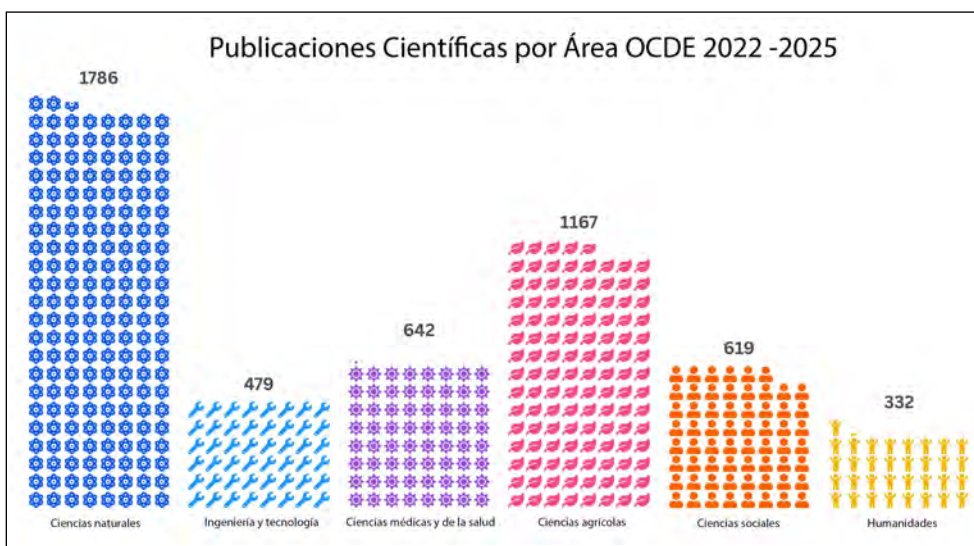
Alejandra Bertrán Delgado

Encargada de Comunicaciones VIDCA

La Universidad Austral de Chile (UACH) es una de las instituciones de educación superior más importantes del país, con presencia en Valdivia, Osorno, Puerto Montt y Coyhaique. Con una Acreditación de Nivel de Excelencia, la UACH es una Universidad compleja y completa, que realiza su quehacer en todas las áreas del conocimiento y que, junto a la docencia de pre y postgrado, sus académicos desarrollan investigación de frontera.

La UACH desarrolla la gestión de la actividad investigativa y creativa a través de la Vicerrectoría de Investigación, Desarrollo y Creación Artística (VIDCA), que constituye la unidad responsable de la gestión integral de la investigación, la innovación y la creación artística en la Universidad.

Esta Vicerrectoría fomenta la internacionalización en sus ámbitos de acción e incrementar la vinculación con el sector público y privado, y la relación Universidad-Gobierno-Empresa-Sociedad. La VIDCA entrega apoyo a académicas/os de la UACH a través de sus tres Departamentos de Investigación, Desarrollo e Innovación y Creación Artística. Los proyectos desarrollados por la comunidad académica de la Universidad se orientan a la generación de nuevo conocimiento con impacto tanto nacional como internacional. Muchos de ellos, además, buscan contribuir al desarrollo integral de la zona sur austral del país, comprendida entre la Región de Los Ríos y la Antártica.





Crédito fotos: Luis Miguel Pardo

CENTRO IDEAL UACH: GENERANDO CONOCIMIENTO EN EL FIN DEL MUNDO

El Centro de Investigación Dinámica de Ecosistemas Marinos de Altas Latitudes (IDEAL) es liderado hacer diez años por la Universidad Austral de Chile (UACH), siendo su institución asociada la Universidad de Concepción (UdeC). El financiamiento logístico para la investigación antártica es proveído por el Instituto Antártico Chileno (INACH). El objetivo principal de IDEAL es medir y comprender los impactos de los factores de estrés ambiental, provocados por el cambio global, sobre la productividad de los ecosistemas marinos en las regiones antártica y subantártica, y sus implicancias para las sociedades que dependen de ellos. Este conocimiento aporta información muy relevante para resolver problemas ambientales, sociales y económicos del país.

Existen tres ejes de investigación principales que se han desarrollado, los que son “cambios en el océano”, “conectividad, bioinvasiones y movi­lidades” y “vulnerabilidades socioecológicas y adaptación al cambio global”.

En cuanto a las colaboraciones del centro, sus principales colaboradores nacionales son el Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) en Coyhaique y la Universidad de Magallanes (UMAG) en Punta Arenas. Debido a la importancias de IDEAL en la investigación antártica y subantártica, a nivel internacional cuenta con la colaboración del Instituto Alfred Wegener para Investigaciones Polares y Marinas (AWI) en Bremerhaven Alemania, Instituto

Oceanográfico Scripps, el Centro de Oceanografía Física Costera (CCPO), ambas de Estados Unidos, el Centro Austral de Investigaciones Científicas (CADIC-Ushuaia) en Argentina y el Instituto de Investigaciones Polares de Corea (KOPRI), entre otros.

MAS ALLÁ DE INVESTIGACIÓN FUNDAMENTAL

Al tratarse de un centro de investigación interdisciplinario el IDEAL aborda otras áreas fuera de la ciencia biológicas y ambientales, por ejemplo recientemente se presentó una nueva publicación que analiza la historia de las mujeres migrantes en la Patagonia ovina, la historia de las mujeres migrantes en territorios coloniales ha sido poco abordada, por lo que el trabajo del historiador, académico de la UACH y miembro de IDEAL, Dr. Alberto Harambour, entrega una parte de la historia que marcó el desarrollo de los territorios. En una línea similar, recientemente el centro participó en una investigación que reveló desigualdades económicas que afectan al sector de la pesca artesanal en Chile, en particular respecto a la distribución de capturas e ingresos entre los propietarios de embarcaciones artesanales para cada región del país. La investigación analizó datos de desembarcos de Sernapesca a nivel nacional y propone acciones para avanzar en las posibles causas que afectan la equidad y sostenibilidad de este sector.

Además, el centro ha organizado, con el apoyo de distintas instituciones, el concurso fotográfico “Ojo de Pez”, el cual se ha realizado por 12 años consecutivos, con la participación de destacados fotógrafos y fotógrafas nacionales e internacionales. En este concurso se han obtenido hermosas imágenes de los ambientes marinos, flora, fauna y el trabajo en mar.



Crédito fotos: Luis Miguel Pardo



CENTRO DE HUMEDALES RÍO CRUCES: CONOCIENDO Y PROTEGIENDO LOS HUMEDALES DEL SUR DE CHILE

Hace diez años se creó, dentro de la estructura de la Universidad Austral de Chile, el Centro de Humedales Río Cruces (CEHUM), el único de estas características en el país, pues se generó a raíz del desastre ambiental del río Cruces en 2004 que concluyó en un fallo inédito del Estado de Chile, que relevó la necesidad de implementar un centro de investigación en humedales como una de sus medidas reparatorias.

El CEHUM ha desarrollado su trabajo no solo en torno al río Cruces, sino que se ha convertido en un referente nacional e internacional en conservación de humedales, y ha sido promotor de la implementación de soluciones basadas en la naturaleza -tales como los humedales depuradores- desde diversos proyectos adjudicados e implementados a nivel nacional. Esta y otras iniciativas han sido claves para que el CEHUM sea nominado como Sitio Demostrativo en Ecohidrología de UNESCO, el segundo en el país.

Es así como más allá de la investigación aplicada que se ha generado en el CEHUM, el equipo se ha volcado también en la gestión de conservación de humedales a través de su vinculación con otras universidades, organizaciones y servicios públicos, elaborando documentos de política pública que han sido relevantes para la implementación, por ejemplo, de la Ley de Humedales Urbanos o la elaboración de estándares de conservación y desarrollo de infraestructura pública.

Además, el CEHUM se ha destacado en este periodo por una fuerte agenda ligada a la educación ambiental, gracias a la adjudicación de diversos fondos que han permitido implementar un museo interactivo y senderos interpretativos exteriores que permiten vivenciar los humedales y sus ecosistemas asociados. Este territorio museo -nombrado como Dr. Roberto Schlatter en honor a quien fuera uno de los precursores de la conservación del humedal del río Cruces- forma parte de la red de museos regionales, recibiendo cientos de visitas de familias, establecimientos educacionales y agrupaciones en forma semanal.

COMITÉ CIENTÍFICO PARA CONVENCIÓN RAMSAR DE HUMEDALES

El pasado mes de octubre, El director ejecutivo del Centro de Humedales Río Cruces de la UACH, Dr. Ignacio Rodríguez Jorquera, fue confirmado como miembro del Grupo de Examen Científico y Técnico de la Convención Ramsar para el Hemisferio Occidental para el periodo 2025-2028.

Es el segundo científico UACH en ser parte de este prestigioso panel de expertos después del Dr. Roberto Schlatter.

El Scientific and Technical Review Panel (STRP) de la Convención Ramsar tiene como objetivo brindar orientación científica y técnica a la Conferencia de las Partes, el Comité Permanente y la Secretaría de la Convención sobre los Humedales.



Crédito fotos: Ramón Rivera



Crédito foto: Prensa UACH

ARTICULACIÓN DEL SISTEMA BIOTECNOLÓGICO DEL SUR DE CHILE

La Universidad Austral de Chile desde su fundación en 1954 ha tenido como misión contribuir al progreso de la sociedad del sur austral del país, no sólo con de la formación de capital humano avanzado, sino que generando nuevo conocimiento a través de investigación de frontera, innovación, transferencia tecnológica y creación artística.

En este sentido la UACH lidera, junto a la Universidad Santo Tomás un Consorcio que se adjudicó el “Centro Tecnológico de Biotecnología para la Sostenibilidad de la Región de Los Ríos”, iniciativa que forma parte del Programa Desarrollo Productivo Sostenible, liderado por el Ministerio de Economía, Fomento y Turismo y Corfo, financiado en conjunto con el Gobierno Regional.

El Centro cuenta como coejecutores a la Corporación SOFOFA Hub, U. Andrés Bello, la Pontificia U. Católica de Chile, UC Davis Chile, Life Sciences Innovation Center, Investigaciones Forestales Bioforest SPA y Fundación Empresarial Comunidad Europea Chile. Como asociados a la Corporación de Empresas de Biotecnología de Chile, Patagonia Startups SpA, Corporación Patagonia Biotech Hub, Agrotecnologías e Ingeniería SPA, Fundación Eurecat Latam y Ganeshalab SPA.

La propuesta se implementará en un horizonte de diez años y tendrá como misión el desarrollo de infraestructura tecnológica, capacitación de capital humano especializado y la generación de una oferta de diversos servicios tecnológicos para empresas y emprendedores que busquen desarrollar soluciones sostenibles de alto valor y potencial de mercado.

CENTRO TECNOLÓGICO DE ECONOMÍA CIRCULAR REGIÓN DE LOS LAGOS

La Universidad Austral de Chile, a través de la Sede Puerto Montt, es parte del Consorcio, lidera por la Universidad San Sebastián, que se adjudicó el proyecto del Centro Tecnológico de Economía Circular CeTEC Los Lagos. La iniciativa es financiada por CORFO y GORE Los Lagos, y se desarrollará por diez años con un aporte de \$9.770 millones de pesos.

El propósito de este Centro es constituir y consolidar en la Región de Los Lagos un Centro Tecnológico de Economía

Circular, que lidere la transformación hacia un modelo económico sostenible, fomentando la Simbiosis Industrial a través de servicios especializados, articulando alianzas intersectoriales (cuádruple hélice) y promoviendo la formación de capital humano en EC.

Junto con esto deberá crear y habilitar infraestructura y equipamiento tecnológico para el desarrollo de soluciones basadas en modelos de economía circular, abordando las brechas y oportunidades que enfrenta la Región de Los Lagos en materia de prevención de generación de residuos, estrategias de reparación, remanufactura, reutilización, reciclaje y disposición final de residuos con el fin de transitar hacia un modelo de desarrollo económico circular.



Crédito foto: Comunicaciones VIDCA

UACH SE ARTICULA CON EL TERRITORIO PARA CONSTRUIR UNA AGENDA COMÚN EN CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN

La Universidad Austral de Chile, en marco del proyecto «Diagnóstico de Brechas Institucionales y diseño de Plan de Frontera I+D+i, Universidad Austral de Chile» del Fondo de Financiamiento Estructural de I+D+i Universitario (FIU) del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, ha desarrollado diferentes acciones que dan cumplimiento a los hitos de esta iniciativa.

Este financiamiento permite fortalecer capacidades institucionales en investigación avanzada, posicionando a la UACH y al sur austral como referente nacional en ciencia aplicada, innovación y desarrollo sostenible. Lo que permite fortalecer su contribución al desarrollo regional y nacional, mejorando de la calidad de vida de las personas en el territorio nacional desde una perspectiva integral de desarrollo económico y socio-cultural.

De manera estratégica la institución ha determinado potenciar su contribución al desarrollo nacional, con enfoque de frontera en dos importantes desafíos nacionales, propuestos por el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación para el Desarrollo. Los desafíos comprenden los asociados a «Naturaleza y Sociedad en Chile» (Desafío 2) y «Transición sostenible de sistemas que sostienen el bienestar» (Desafío 3).

La UACH, dada su ubicación geográfica privilegiada en la zona sur-austral de Chile y su trayectoria en esta área de investigación, se encuentra en una posición única para generar conocimiento y comprensión sobre la diversidad de los sistemas socio-ecológicos del país y en particular de su zona de influencia actual (de Valdivia a la Antártica), aportando al Desafío 2. Así mismo, la Universidad cuenta con un importante grupo de investigadores(as) en áreas como biomedicina, salud, agroalimentos, ingeniería, artes y ciencias sociales, que promueven el desarrollo de soluciones innovadoras para mejorar el bienestar integral de la población, lo que nos posiciona para aportar activamente al Desafío 3.

Ejes Estratégicos transversales de investigación

Para fortalecer la orientación estratégica de su quehacer investigativo y dar mayor coherencia a una oferta históricamente diversa, la UACH ha definido, por primera vez, tres ejes transversales de investigación que organizan sus capacidades en grandes áreas prioritarias.

Eje 1: Territorio, cambio ambiental global, sostenibilidad y transición socioecológica

Agrupa líneas orientadas a la comprensión de los impactos del cambio climático, la conservación de la biodiversidad, la restauración de ecosistemas y la gobernanza ambiental. Su foco principal es el Desafío 2: Naturaleza y sociedad, con alta pertinencia territorial y proyección internacional.

Eje 2: Salud integral, biotecnología y tecnologías para el bienestar

Integra líneas que abordan la salud humana y animal, la biotecnología aplicada, la salud pública y el desarrollo de tecnologías inclusivas, con énfasis en el Desafío 3: Sistemas sociotécnicos para el bienestar. Este eje busca consolidar capacidades emergentes y diversificar la oferta disciplinar.

Eje 3: Culturas, educación, patrimonios y transformaciones sociales para el bienestar

Reúne líneas dedicadas al estudio del patrimonio cultural, la educación inclusiva, la cohesión social y la calidad de vida. Su aporte es especialmente relevante para el Desafío 3, proyectando la investigación de la UACH en agendas nacionales e internacionales de equidad y desarrollo humano.



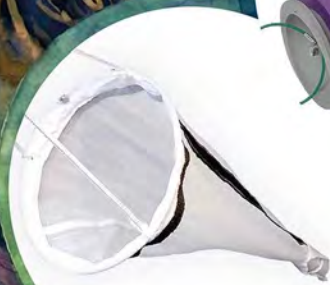
Dentro de las acciones realizadas, la UACH se reunió con representantes de los sectores públicos, privados, académicos y gremiales de las regiones de Aysén, Los Lagos y Los Ríos. Durante estas jornadas, se realizó un trabajo conjunto para identificar brechas, necesidades y oportunidades de articulación entre la UACH y el territorio, con el objetivo de construir una agenda común que conecte ciencia, innovación y el territorio.

Estos talleres buscaron ser un espacio de diálogo y co-construcción, donde se abordaron los ejes estratégicos de investigación definidos por la Universidad, orientados a promover el desarrollo sostenible y el desarrollo de investigación científica acorde a las necesidades de los territorios.



AquaBC

**MICROSCOPIA, SOLUCIONES
INTEGRALES EN MONITOREO
AMBIENTAL Y FLORACIONES
ALGALES NOCIVAS.**



**DONDE EL SERVICIO
Y LA EXPERIENCIA SE
ENCUENTRAN.**

**www.aquabc.cl
team@aquabc.cl**

Yesotoxinas: ¿Una amenaza para la industria miticultora chilena?



Patricio A. Díaz^{1,2*}, Andrés Marín³, Carlos Molinet^{2,4}, Doris Soto², Manuel Díaz⁴, Pamela A. Fernández¹, Iván Pérez-Santos^{1,5}, Camila Barria⁶, Carlos Lara⁷, Cristina Hernández⁸, David Cassis⁹, Gonzalo Álvarez^{10, 11}

¹ Centro i-mar, Universidad de Los Lagos, Puerto Montt, Chile

² Centro Interdisciplinario para la Investigación Acuicola - Investigación Aplicada (INCAR2), Universidad de Concepción, Concepción, Chile

³ Departamento de Ciencias Sociales, Universidad de Los Lagos, Osorno, Chile

⁴ Programa de Investigación Pesquera, Instituto de Acuicultura, Universidad Austral de Chile, Chile

⁵ Centro de investigación oceanográfica COPAS COASTAL, Universidad de Concepción, Chile

⁶ Instituto Tecnológico de la Miticultura (INTEMIT), Castro, Chile

⁷ Departamento de Ecología, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile

⁸ Departamento Laboratorios Salud Pública, SEREMI de Salud Región de Los Lagos, Puerto Montt, Chile

⁹ AquaBC Chile Spa, Puerto Varas, Chile

¹⁰ Departamento de Acuicultura, Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Católica del Norte, Larrondo 1281, Coquimbo, Chile

¹¹ Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Algas (CIDTA), Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Católica del Norte, Coquimbo, Chile

* Autor de correspondencia: patricio.diaz@ulagos.cl

El cultivo del mejillón chileno (*Mytilus chilensis*) se ha convertido en las últimas décadas en una industria creciente en el sur de Chile, desempeñando un importante papel en las economías regionales y locales, y abasteciendo casi el 20% del consumo mundial de mitílidos (Baquedano et al., 2025; González-Poblete et al., 2018). Esta pujante actividad acuícola se desarrolla principalmente en la Región de Los Lagos donde se registran más de 1.300 centros de acuicultura inscritos destinados al cultivo de moluscos (principalmente mejillones tanto en captación de semillas, como en engorda) y una producción que superó las 406.000 toneladas de *M. chilensis* en 2024 (Sernapesca, 2024). Estos niveles productivos posicionan a Chile como el segundo productor mundial de este recurso, con exportaciones superiores a los 298 millones de dólares durante el mismo año (ProChile, 2025).

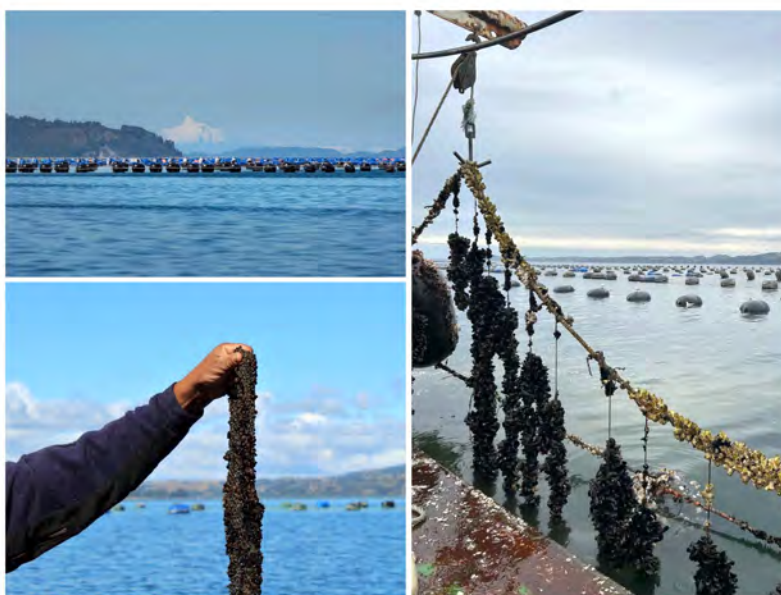


Figura 1: Cultivo de mejillón chileno (*Mytilus chilensis*) en la región de Los Lagos, sur de Chile, mostrando estructuras de producción suspendida y cuerdas de cultivo con organismos en crecimiento.

La cadena de valor de la miticultura en Chile se encuentra consolidada en la Región de Los Lagos, donde constituye un componente fundamental de la economía regional. En esta región, la industria está constituida por más de 620 empresas, predominantemente micro (65%), pequeñas (24%) y medianas (4%), que desarrollan actividades clave del proceso productivo, tales

como la captación de semillas, el engorde en centros de cultivo y el procesamiento industrial (Fig. 1). En su conjunto, este sector genera empleo directo e indirecto para aproximadamente 17.000 personas, lo que equivale a cerca del 4% del empleo regional. En la cadena productiva destacan las labores desarrolladas en las plantas de proceso, cuya intensa actividad es realizada principalmente por mujeres.

Diversos estudios han analizado los factores ambientales que

pueden amenazar la sostenibilidad de la industria, entre los cuales destacan la disponibilidad de alimento (Lara et al., 2016), la sobrepesca de semillas de mejillón y el incremento en la salinidad producto de una marcada tendencia en la reducción de los aportes de agua dulce por precipitación y disminución en caudales de los ríos que desembocan al sistema de fiordos de la Patagonia Noroccidental (Molinet et al., 2025b). Sumado a lo anterior, el estado de conservación de los bancos naturales de mejillón chileno ha sido sugerido como un factor crítico para asegurar la disponibilidad de semillas en el ciclo productivo (Molinet et al., 2025a). Sin embargo, el efecto de las Floraciones Algaes Nocivas y las biotoxinas marinas asociadas sobre las etapas tempranas de los mejillones (larvas y juveniles) ha recibido escasa atención (Díaz et al., 2024; Villalobos et al., 2025).

Floraciones Algaes Nocivas (FAN en adelante), es el término acuñado por la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de la UNESCO para describir cualquier proliferación de microalgas, independientemente de su concentración, percibida como un daño por su impacto socioeconómico (daños a la salud pública, bienes y servicios costeros) (Granéli et al., 1999). Las FANs de especies productoras de toxinas, como son los dinoflagelados *Alexandrium catenella*, *Dinophysis acuta* y *Protoceratium reticulatum*, entre otros, representan la principal amenaza natural para las explotaciones de bivalvos y la salud pública, en particular en el sur de Chile. Sin embargo, los intensos episodios asociados a la presencia de toxinas paralizantes, lipofílicas y amnésicas; que conducen al cierre sanitario de zonas de extracción para proteger la salud de los consumidores; han generado impactos menores en la producción, principalmente porque las áreas de engorda de mejillones no se han visto afectadas y/o porque la aparición de FANs no ha afectado de forma significativa los tiempos de cosecha (Díaz et al., 2019). Entre los moluscos bivalvos, los mejillones presentan altas tasas de detoxificación, lo que permite a los productores reanudar rápidamente sus actividades una vez superados los eventos tóxicos. Como organismos filtradores, los mejillones eliminan eficientemente diversos compuestos tóxicos, facilitando la recuperación productiva en sistemas acuícolas. No obstante, estudios recientes sugieren que las yesotoxinas (YTX) y algunos de sus análogos; compuestos marinos tipo poliéter producidos principalmente por el dinoflagelado *Protoceratium reticulatum* pueden generar importantes impactos ambientales y biológicos en distintas etapas del desarrollo de invertebrados marinos, incluyendo larvas, juveniles y adultos de bivalvos filtradores (Álvarez et al., 2020; Nieves et al., 2024a; Nieves et al., 2024b).

En las últimas décadas se ha observado, a escala global, un aparente incremento en la frecuencia, intensidad y expansión geográfica de los eventos tóxicos asociados a FANs (Wells et al., 2020). Esta tendencia ha sido atribuida, en parte, al aumento sostenido en la explotación de los recursos costeros, incluyendo la expansión de la acuicultura y diversas actividades recreativas, así como al crecimiento exponencial de los programas de seguimiento y monitoreo (Anderson et al., 2008; Hallegraef, 2010).

No obstante, esta interpretación ha sido cuestionada recientemente por un metaanálisis basado en la base de datos global HAEDAT del IOC-UNESCO (<https://haedat.iode.org>), el cual no encontró evidencia concluyente de un aumento global en la ocurrencia de FANs durante las últimas tres décadas. Más bien, los autores sugieren que el incremento en los reportes podría reflejar la expansión y mejora de los sistemas de vigilancia y monitoreo a nivel mundial (Hallegraef et al., 2021). A pesar de esta controversia, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) ha reconocido la posible intensificación de las FAN en el contexto del cambio climático. En su Quinto Informe de Evaluación (AR5), el IPCC destacó que estas floraciones constituyen un problema global de creciente relevancia, señalando que el aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos podría estar parcialmente asociado al calentamiento oceánico, mayor disponibilidad de luz debido a la reducción de días sin lluvia, las fluctuaciones en la disponibilidad de nutrientes y los procesos de eutrofización costera (Bindoff et al., 2019). Asimismo, la expansión geográfica, junto con la mayor duración e intensidad de los eventos de FAN, ha sido identificada como un tema prioritario dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. En particular, el ODS 14 ("Vida submarina") destaca que actividades como la agricultura, la acuicultura y la descarga de aguas residuales incrementa la carga de nutrientes en los sistemas costeros, favoreciendo procesos de eutrofización y el desarrollo de floraciones algales nocivas (UN DESA, 2023).

En este contexto, independientemente de que aún no exista evidencia inequívoca de un aumento global en la frecuencia e intensidad de los eventos de FAN como consecuencia directa del cambio climático, resulta claro que el incremento sostenido de las temperaturas oceánicas está modificando la distribución de diversas especies de fitoplancton tóxico. Estos desplazamientos biogeográficos, que amplían el rango de ocurrencia de especies productoras de toxinas, podrían afectar a organismos de interés comercial en latitudes donde estos eventos han sido históricamente menos frecuentes. En este sentido, el reciente informe 2024 sobre el "Estado del Océano" destacó que la variabilidad de las FAN y sus vínculos con estresores climáticos y antropogénicos deben analizarse a escalas regionales y locales, prestando especial atención a los rasgos adaptativos y a la plasticidad fisiológica de las especies formadoras de FAN (IOC-UNESCO, 2024). Esta perspectiva regional resulta particularmente relevante, dado que la respuesta de los ecosistemas costeros depende en gran medida de la interacción entre forzantes climáticos de gran escala y procesos hidrográficos locales, los cuales pueden amplificar o atenuar los impactos de estos eventos.

Hallegraef (2010) propuso que, bajo diferentes escenarios de cambio climático global, es esperable que se modifique la competitividad relativa de distintas especies formadoras de FAN, dando lugar a "ganadores" y "perdedores", dependiendo de su tolerancia fisiológica y capacidad de adaptación a nuevas condiciones ambientales. En este contexto, el dinoflagelado

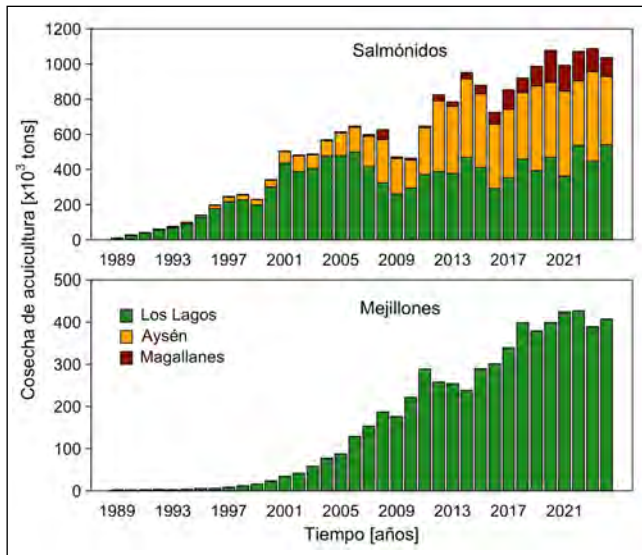


Figura 2: Evolución de las cosechas de acuicultura de salmónidos (superior) y mejillones (inferior) entre 1988 y 2024 en las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes.

Protoceraium reticulatum podría constituir una de las especies potencialmente favorecidas, dado que incrementa su toxicidad y tasa de crecimiento frente a aumentos de temperatura y salinidad (Guerrini et al., 2007). Considerando la tendencia climática observada en la Patagonia Noroccidental; caracterizada por una marcada disminución de la precipitación estival y otoñal a tasas de 5–7% por década lo que implica mayor disponibilidad

de luz, junto con un incremento sostenido de la temperatura; se configuran condiciones propicias para la proliferación de FAN en esta región (Garreaud et al., 2013; Marquet et al., 2023; Sauter, 2020). A ello se suman eventos oceanográficos anómalos y extremos, como las olas de calor marinas (MHW, por sus siglas en inglés), que pueden intensificar la estratificación, alterar la disponibilidad de nutrientes y promover el desarrollo de especies tóxicas en la Patagonia Noroccidental (Pujol et al., 2022; Pujol et al., 2025).

El sistema de fiordos y canales de las regiones de Aysén y Magallanes se caracteriza por una elevada productividad primaria, lo que genera condiciones altamente favorables para el desarrollo de la acuicultura de bivalvos. Sin embargo, la alta frecuencia de FANs registrada en esta zona durante las últimas décadas ha impedido la consolidación de la mitilicultura y de otros cultivos de bivalvos filtradores debido principalmente por las medidas tendientes a proteger la salud humana debido a eventos tóxicos que pudieran poner en riesgo a los consumidores. Este escenario contrasta marcadamente con el crecimiento exponencial observado en la Región de Los Lagos. Contrariamente, la samomicultura ha logrado expandirse hacia las regiones más australes llegando a una producción que supera 1,000,000 toneladas por año (Fig. 2). Los mejillones son altamente sensibles a la variabilidad y a perturbaciones ambientales, y los efectos asociados dependen en gran medida de la etapa del ciclo de vida. De hecho, en los últimos años la industria ha tenido una disminución cercana al 40% en la siembra debido a la escasez de

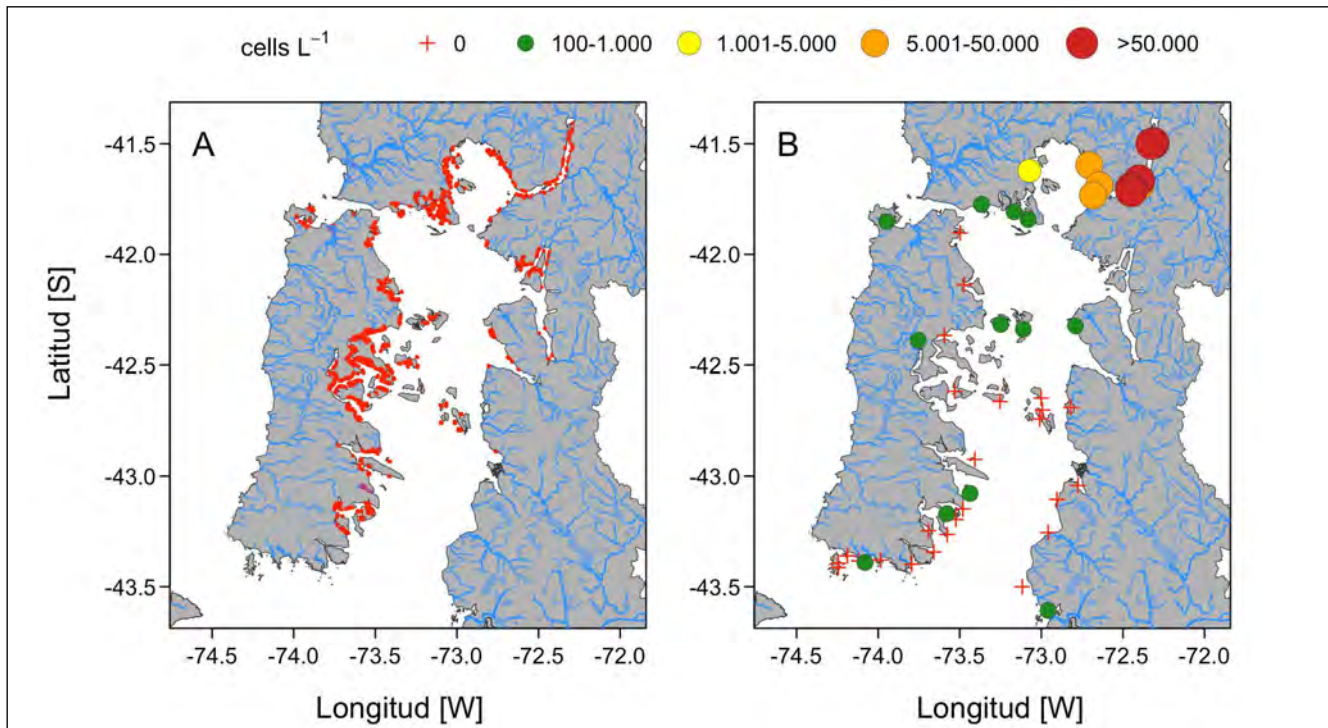


Figura 3: A) Distribución espacial de las concesiones de acuicultura en la Región de Los Lagos. Los polígonos rojos indican la ubicación de las concesiones vigentes en el área de estudio. B) Densidades máximas de *Protoceraium reticulatum* registradas 2006 y 2018 en el marco del Programa de Monitoreo mensual del Instituto de Fomento Pesquero (IFOP). Los símbolos representan rangos de concentración (células L⁻¹).

semilla lo que ha impactado negativamente los volúmenes de cosecha (www.amichile.cl). Durante el período 2024-2025, la baja captación de semillas; particularmente en el Seno de Reloncaví y en sectores de Hualaihué; ha generado preocupación por un potencial impacto adicional en la producción. Esta situación se ve agravada por la alta dependencia del sector respecto de la principal zona de captación de semilla, ubicada en el fiordo Reloncaví, que coincide con el epicentro de las FAN causadas por el dinoflagelado *Protoceratium reticulatum* (Fig. 3). Sumado a lo anterior, una intensa floración de *P. reticulatum* (~400.000 células L⁻¹) registrada a finales de verano e inicios de otoño de 2022 en las regiones de Los Lagos y Aysén, generó el primer cierre sanitario a nivel nacional debido a concentraciones de YTX que superaron el límite permisible para el consumo humano (3,75 mg kg⁻¹). En este evento, los niveles de toxina alcanzaron valores máximos de 17 mg kg⁻¹ en *M. chilensis* provenientes de la Región de Los Lagos (Fig. 4).

En la Patagonia Norte, la alta frecuencia de *P. reticulatum* y la presencia de YTX constituye un riesgo potencial para el desarrollo de la industria del cultivo de mejillones debido al potencial impacto de este tipo de toxinas en estadios tempranos (larvas y juveniles) de mejillón chileno y que hasta ahora se ha subestimado porque no presenta riesgo para la salud humana. Ello resulta particularmente relevante considerando que, en otras partes del mundo; incluido el norte de Chile; las FAN asociadas a este dinoflagelado han provocado mortalidades masivas de organismos marinos tanto en ambientes naturales como en concesiones acuícolas. Al respecto, Rogers-Bennett et al. (2012) reportaron una mortalidad masiva de poblaciones naturales del abalón *Haliotis rufescens* en las costas de California. Del mismo modo, Pitcher et al. (2019) reportaron la mortalidad de miles de abalones en centros de cultivo en tierra durante una FAN asociada a la presencia de los dinoflagelados *Gonyaulax spinifera* y *Lingulodinium polyedrum* en Sudáfrica. En ambos casos, los tejidos de los animales revelaron una concentración aproximada de 0,10 mg YTX kg⁻¹ de los cuales la mayor proporción se encontró en las branquias.

En Chile, Álvarez et al. (2011) reportaron la mortalidad de juveniles de *Argopecten purpuratus* (12 ± 2 mm) durante una intensa floración

del dinoflagelado *Protoceratium reticulatum* en Bahía Mejillones, Región de Antofagasta, con densidades cercanas a 350.000 células L⁻¹ en la columna de agua. Posteriormente, en 2019, se registraron eventos de mortalidad masiva de moluscos (*Ameghinomya antiqua* y *Dosidicus gigas*) y equinodermos (*Stichaster striatus* y *Loxechinus albus*) a lo largo de la costa de las regiones de Tarapacá, Atacama y Coquimbo. Durante estos episodios, las concentraciones de YTX oscilaron entre 0,1 y 0,42 mg kg⁻¹ (Álvarez et al., 2020). Nieves et al. (2024b), con el propósito de comprender los efectos del dinoflagelado *P. reticulatum* y las YTX en larvas de invertebrados marinos desarrollaron estudios en el ostión del norte (*Argopecten purpuratus*). Los resultados demostraron que la supervivencia de las larvas se ve seriamente amenazada por la presencia del

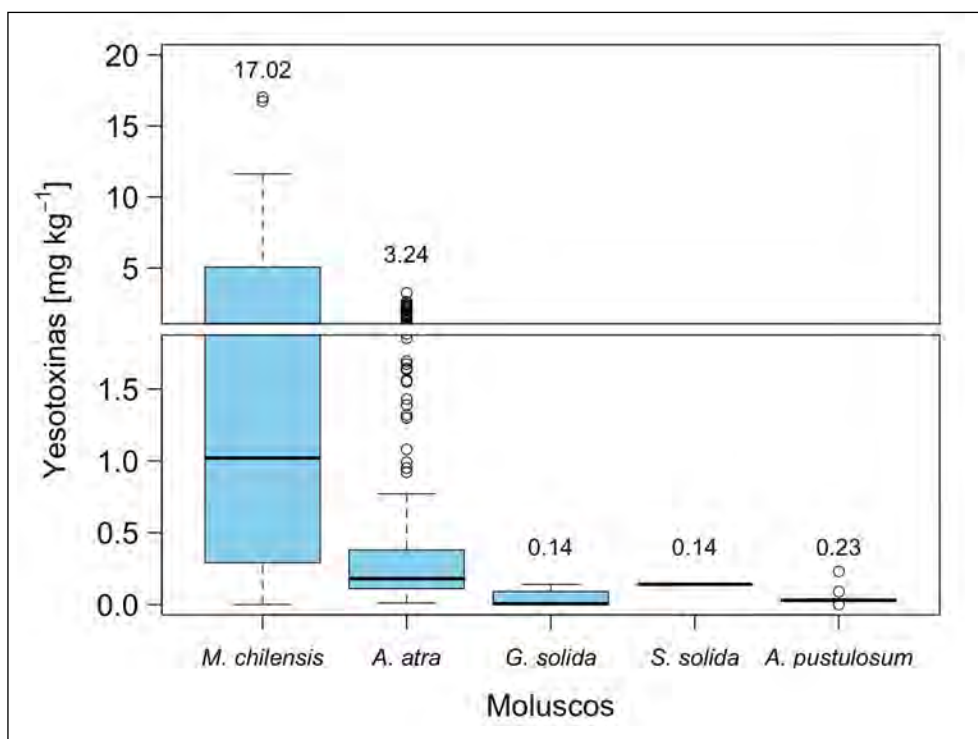


Figura 4: Concentración de yesotoxinas (mg kg⁻¹) registradas en cinco especies de moluscos de la Región de Los Lagos durante el brote de marzo de 2022.

dinoflagelado y la YTX. El peligro principal no radica en la ingesta del dinoflagelado; cuya célula es demasiado grande para ser consumida; sino en la toxina exudada o disuelta en el agua. Mientras que densidades bajas son tolerables, concentraciones de YTX producidas por densidades superiores a 2.000 células mL⁻¹ provocan una caída drástica en la supervivencia de *A. purpuratus* alcanzando niveles críticos de entre el 40% y 60%. A nivel biológico, la YTX actúa como un disruptor celular que ataca el citoesqueleto (específicamente la actina y cadherina), destruyendo la arquitectura interna de las células. Esto deriva en daños severos en las branquias y la glándula digestiva, lo que impide que las larvas respiren y procesen energía adecuadamente, llevándolas a la muerte por estrés fisiológico o fallas sistémicas. Del mismo modo, Nieves et al. (2024a) evaluaron los impactos

de este dinoflagelado tóxico en juveniles de *A. purpuratus* determinando que la presencia de *P. reticulatum* afecta negativamente las tasas fisiológicas relacionadas con la alimentación como aclaramiento, ingestión y absorción, entre otras. A nivel celular, la toxina induce un fuerte estrés oxidativo y apoptosis, provocando la desintegración de los epitelios en las branquias y la glándula digestiva, lo que anula la capacidad del organismo para respirar y procesar nutrientes. Esta agresión activa una respuesta inmunitaria masiva caracterizada por la infiltración de hemocitos y procesos de melanización, donde el sistema de defensa del molusco intenta encapsular la amenaza como si fuera un patógeno. Sin embargo, debido a que la YTX es liposoluble, esta puede quedar atrapada en las reservas energéticas del animal, prolongando el daño tisular incluso durante la fase de desintoxicación.

En conjunto, estos mecanismos podrían explicar las fallas en el reclutamiento y la captación de semillas, ya que las larvas sufren un colapso funcional y energético que les impide fijarse y sobrevivir en el entorno productivo. De este modo, esta "toxicidad invisible" podría explicar por qué, en muchas ocasiones, la captación de semillas fracasa sin una causa ambiental evidente debido a que las larvas mueren o se debilitan antes de lograr fijarse en los colectores, transformando lo que debería ser un periodo de reclutamiento exitoso en una pérdida productiva silenciosa para la industria acuícola. Sin embargo, los impactos de este tipo de floraciones están lejos de conocerse en profundidad y podrían ser una gran amenaza a la creciente industria de la mitilicultura en Chile, por lo cual, es urgente avanzar en su estudio.

Financiamiento: Este trabajo fue financiado por el proyecto FONDECYT 1231220 "Environmental control of *Dinophysis* bloom development and their contribution to lipophilic toxin events in the Chilean Patagonia" de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID).

REFERENCIAS

Álvarez, G., Rengel, J., Álvarez, F., Pino, R., Muñoz, P., Rosales, S., Hevia, V., Araya, M., Díaz, P.A., Rivera, A., Blanco, J., 2020. Mass mortality of marine invertebrates associated by the presence of yessotoxins in northern Chile. *Harmful Algae News* 64, 6-7.

Álvarez, G., Uribe, E., Díaz, R., Braun, M., Mariño, C., Blanco, J., 2011. Bloom of the yessotoxin producing dinoflagellate *Protoceratium reticulatum* (Dinophyceae) in northern Chile. *J. Sea Res.* 65, 427-434.

Anderson, D.M., Burkholder, J.M., Cochlan, W.P., Glibert, P.M., Gobler, C.J., Heil, C.A., Kudela, R.M., Parsons, M.L., Rensel, J.E., Townsend, D.W., Trainer, V.L., Vargo, G.A., 2008. Harmful algal blooms and eutrophication: examining linkages from selected coastal regions of the United States. *Harmful Algae* 8, 39-53.

Baquedano, M., Chávez, C., Dresdner, J., Eggert, H., 2025. The rise of mussel aquaculture in Chile: Causes, effects, and challenges. *Reviews in Aquaculture* 17, e70045.

Bindoff, N.L., Cheung, W.W.L., Kairo, J.G., Ari´stegui, J., Guinder, V.A., Hallberg, R., Hilmi, N., Jiao, N., Karim, M.S., Levin, L., O'Donoghue, S., Purca Cuicapusa, S.R., Rinkevich, B., Suga, T., Tagliabue, A., Williamson, P., 2019. Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Portner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 447-587. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.007>.

Díaz, P.A., Álvarez, A., Varela, D., Pérez-Santos, I., Díaz, M., Molinet, C., Seguel, M., Aguilera-Belmonte, A., Guzmán, L., Uribe, E., Rengel, J., Hernández, C., Segura, C., Figueroa, R.I., 2019. Impacts of harmful algal blooms on the aquaculture industry: Chile as a case study. *Perspect. Phycol.* 6, 39-50.

Díaz, P.A., Araya, M., Cantarero, B., Miranda, C., Varela, D., Figueroa, R.I., Basti, L., Carbonell, P., Araverana, Á., Pérez-Santos, I., Nieves, M.G., Álvarez, G., 2024. Are yessotoxins an emerging problem in Chile? Context and perspectives following the first report of YTX levels exceeding the regulatory limit in the Patagonian fjord system. *Environ. Pollut.* 361, 124844.

Garreaud, R., López, P., Minvielle, M., Rojas, M., 2013. Large-scale control on the Patagonian climate. *J. Climate* 26, 215-230.

González-Poblete, E., Hurtado, C.F., Rojo, C., Norambuena, R., 2018. Blue mussel aquaculture in Chile: Small or large scale industry? *Aquaculture* 493, 113-122.

Granéli, E., Codd, G.A., Dale, B., Lipiatou, E., Maestrini, S.Y., Rosenthal, H., 1999. EUROHAB Science Initiative: Harmful Algal Blooms in European Marine and Brackish Waters. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg., p. 97.

Guerrini, F., Ciminiello, P., Dell'Aversano, C., Tartaglione, L., Fattorusso, E., Boni, L., Pistocchi, R., 2007. Influence of temperature, salinity and nutrient limitation on yessotoxin production and release by the dinoflagellate *Protoceratium reticulatum* in batch-cultures. *Harmful Algae* 6, 707-717.

Hallegraeff, G., 2010. Ocean climate change, phytoplankton community responses, and harmful algal blooms: A formidable predictive challenge. *J. Phycol.* 46, 220-235.

Hallegraeff, G., Enevoldsen, H., Zingone, A., 2021. Global harmful algal bloom status reporting. *Harmful Algae* 102, 101992.

- Hallegraeff, G.M., 1993. A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia* 32, 79-99.
- IOC-UNESCO, 2024. State of the Ocean Report. Paris, IOC-UNESCO. (IOC Technical Series, 190). <https://doi.org/10.25607/4wbg-d349>.
- Lara, C., Saldías, G.S., Tapia, F.J., Iriarte, J.L., Broitman, B.R., 2016. Interannual variability in temporal patterns of Chlorophyll-a and their potential influence on the supply of mussel larvae to inner waters in northern Patagonia (41–44°S). *J. Marine Syst.* 155, 11-18.
- Marquet, P.A., Buschmann, A.H., Corcoran, D., Díaz, P.A., Fuentes-Castillo, T., Garreaud, R., Plischoff, P., Salazar, A., 2023. Global change and acceleration of anthropic pressures on Patagonian Ecosystems, in: Castilla, J.C., Armesto, J.J., Martínez-Harms, M.J., Tecklin, D. (Eds.), *Conservation in Chilean Patagonia. Integrated Science*, Springer, Cham, pp. 33-65.
- Molinet, C., Soto, D., Díaz, M., Díaz, P.A., Espinoza, K., Henríquez, J., Matamala, T., León-Muñoz, J., Segura, C., 2025a. Effects of wild seed demand for mussel farming on mussel populations in a fjord: a tool to assess seed collecting effort. *Aquaculture* 611, 742964.
- Molinet, C., Soto, D., León-Muñoz, J., Díaz, M., Espinoza, K., Henríquez, J., Matamala, M., 2025b. Climate-driven changes in freshwater inputs to a Northern patagonia Fjord and overfishing of wild mussel seed could threaten Chilean mussel farming. *Climatic Change* 178, 119.
- Nieves, M.G., Álvarez, G., López-Carvallo, J.A., Millanao, P., Araya, M., Díaz, R., Díaz, P.A., 2024a. Effects of the toxic dinoflagellate *Protoceratium reticulatum* on physiological rates of juvenile scallops *Argopecten purpuratus*. *Fishes* 9, 331.
- Nieves, M.G., Díaz, P.A., Araya, M., Salgado, P., Rojas, R., Quiroga, E., Pizarro, G., Álvarez, G., 2024b. Effects of the toxic dinoflagellate *Protoceratium reticulatum* and its yessotoxins on the survival and feed ingestion of *Argopecten purpuratus* veliger larvae. *Mar. Pollut. Bull.* 199, 116022.
- Pitcher, G.C., Foord, C.J., Macey, B.M., Mansfield, L., Mouton, A., Smith, M.E., Osmond, S.J., van der Molen, L., 2019. Devastating farmed abalone mortalities attributed to yessotoxin-producing dinoflagellates. *Harmful Algae* 81, 30-41.
- ProChile, 2025. Informe de exportaciones no cobre no litio: Diciembre 2024. ProChile. <https://cdc.prochile.cl/wp-content/uploads/2025/01/Informe-Exportaciones-No-Cobre-No-Litio-Diciembre-2024.pdf>.
- Pujol, C., Pérez-Santos, I., Barth, A., Alvera-Azcárate, A., 2022. Marine heatwaves offshore central and south Chile: Understanding forcing mechanisms during the years 2016-2017. *Front. Mar. Sci.* 9, 800325.
- Pujol, C., Pérez-Santos, I., Barth, A., Díaz, P., Mancilla-Gutiérrez, G., Linford, P., Alvera-Azcárate, A., 2025. Extreme temperature events in the semi-enclosed inner sea of Northern Chilean Patagonia, in: Pérez-Santos, I., de Barros, D., Rojas, X., Tucça, F., Saldías, G., Sobarzo, M., Valle-Levinson, A., Franca, C.A. (Eds.), *Latin American Physics of Estuaries and Coastal Oceans – LAPECO 2025*, Puerto Varas, Chile.
- Rogers-Bennett, L., Kudela, R., Nielsen, K., Paquin, A., O'Kelly, C., Langlois, G.W., Crane, D.B., Moore, J., 2012. Dinoflagellate bloom coincides with marine invertebrate mortalities in northern California. *Harmful Algae News* 46, 10-11.
- Sauter, T., 2020. Revisiting extreme precipitation amounts over southern South America and implications for the Patagonian Icefields. *Hydrology and Earth System Sciences* 24, 203-216.
- Sernapesca, 2024. Anuario Estadístico de Pesca. Servicio Nacional de Pesca, Valparaíso.
- Villalobos, V.I., Morales-Torres, D.F., Valdivia, N., Rivera-Hechem, M.I., Gisecke, R., Piñones, A., Mardones, J.I., Garcés-Vargas, J., Segura, C.J., Navarro, J.M., Outeiro, L., 2025. Responses of mussel farms to Harmful Algal Bloom governance are shaped by the scale of production: implications for equitable blue economy. *Harmful Algae* 144, 102821.
- Wells, M.L., Karlson, B., Wulff, A., Kudela, R., Trick, C., Asnaghi, V., Berdalet, E., Cochlan, W., Davidson, K., De Rijcke, M., Dutkiewicz, S., Hallegraeff, G., Flynn, K.J., Legrand, C., Paerl, H., Silke, J., Suikkanen, S., Thompson, P., Trainer, V.L., 2020. Future HAB science: Directions and challenges in a changing climate. *Harmful Algae* 91, 101632.

SOCIO LÍDER CON VISIÓN, ORIGINALIDAD Y CONTINUIDAD CON MÁS DE 40 AÑOS DE EXPERIENCIA DEMOSTRADA



I + D + I

- **DIVERSIFICACIÓN**
- **INNOVACIÓN**
- **AJUSTES DE TECNOLOGÍAS**
- **OPTIMIZACIÓN**
- **ACUICULTURA Y AGRICULTURA**
- **ACUICULTURA DE PEQUEÑA ESCALA**
- **REPOBLAMIENTO PARA LA PESCA ARTESANAL**
- **TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA**

OPCION COMUNICACIONES®



UNIVERSIDAD DE LOS LAGOS
DEPARTAMENTO DE ACUICULTURA Y
RECURSOS AGROALIMENTARIOS

Proyecto en Desarrollo cuenta con el
financiamiento de ANID

**OPTIMIZACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS
COMBINADAS DE LUZ Y SALES PARA
PRODUCIR Y MEJORAR LA CALIDAD DEL
SMOLT EN LA SALMONICULTURA
NACIONAL**

Código IT2410140.

DOCENCIA

INGENIERÍA EN ACUICULTURA SOSTENIBLE
(Desde 2024 con malla curricular
rediseñada para el futuro)

PECES - MOLUSCOS - ALGAS - PESCA RECREATIVA - AMBIENTE - ALIMENTOS



Subsecretaría
de pesca



**GOBIERNO
REGIONAL DE
LOS LAGOS**



5 UNIVERSIDAD ACREDITADA
Septiembre de 2021 - Septiembre de 2026
Gestión Institucional - Docencia de Pregrado
Investigación - Vinculación con el Medio
años **AVANZADA**

Alberto Medina A. • e-mail: amedina@ulagos.cl; respinoza@ulagos.cl; jcuribe@ulagos • (56-64) 2333303 - 18 - 19
Campus Chuyaca • Avda. Fuchslocher N°1305 • Pabellón Lago Riñihue • Osorno • Región de los Lagos

ALIMENTAR AL SALMÓN CON LA FUERZA DE LA TIERRA CHILENA

Proyecto apoyado por



Daniel Nieto Díaz-Muñoz PhD

Gerente Programa Tecnológico PTEC-INVA.

www.inva.cl

Salmones Antártica – Corfo

CÓMO EL PTEC INVA ESTÁ CREANDO UNA REVOLUCIÓN AGRÍCOLA, AMBIENTAL Y SOCIAL EN EL SUR DEL PAÍS

1. Una oportunidad que Chile no puede dejar pasar

La salmonicultura es uno de los grandes orgullos productivos de Chile. Año tras año, desde La Araucanía hasta Magallanes, la industria genera más de US\$6.000 millones en exportaciones y sostiene la vida laboral de 80.000 familias.

Sin embargo, tras ese éxito hay un dato que pocos conocen: el alimento que consumen los salmones - la base de su crecimiento y la principal responsable de la huella de carbono del sector - depende casi por completo del extranjero.

Hoy, Chile importa cerca del 85% de sus insumos vegetales para fabricar pellet: harinas proteicas, aceites y concentrados provenientes de Brasil, Argentina, Estados Unidos y Europa. Son más de 800.000 toneladas al año, viajando miles de kilómetros para llegar a plantas de alimentación acuícola en el sur del país.

El costo ambiental es grande: transporte terrestre en origen, transporte marítimo intercontinental, riesgos de cambio de uso de suelo en países exportadores —como ocurre con parte de la soja del Cerrado brasileño— y volatilidad logística global. No es casualidad que entre el 60% y 70% de la huella de carbono del salmón provenga del alimento.

¿Y si pudiéramos producir esos insumos aquí mismo, en Chile, aprovechando nuestras tierras, agricultores, conocimiento científico y la capacidad industrial ya instalada?

¿Y si la agricultura nacional pudiera convertirse en una aliada estratégica de la acuicultura?

Eso exactamente está logrando el PTEC INVA, un Programa apoyado por CORFO y ejecutado por un consorcio nacional que integra a centros científicos, agricultores, empresas de innovación y la industria salmonicultura. Salmones Antártica como empresa líder, y como coejecutores las empresas Agrotop, el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias INIA, el Centro de Tecnología e Innovación Alimentaria CeTA, el laboratorio VEHICE y las Universidades de Chile y Católica de Temuco trabajando juntos con una premisa simple y transformadora: cultivar y procesar en Chile los insumos vegetales que hoy importamos.

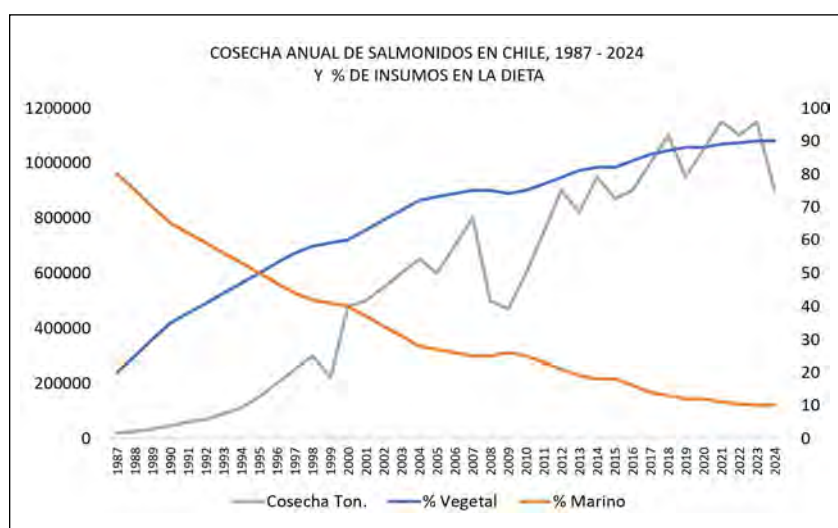


Gráfico 1: Relación entre cosecha de salmón y trucha (ton) en Chile, 1987 - 2024, y % de insumos vegetales y de origen marino en la dieta de los peces en cultivo.

El impacto es enorme: menos emisiones, más empleos, más ciencia, más soberanía productiva y una agricultura fuerte y moderna.

2. El corazón del cambio: producir aquí lo que antes venía de lejos

Si Chile logra reemplazar una parte relevante de los ingredientes importados por equivalentes nacionales, puede conseguir una reducción directa del 5% al 10% en la huella de carbono del salmón chileno, un impacto gigantesco considerando la escala de nuestra producción anual, cercana al millón de toneladas.

Para lograrlo, el PTEC INVA está desarrollando y validando cultivos como lupino, arveja, camelina, raps convencional y raps omega-3, adaptados especialmente a las condiciones agroclimáticas del sur de Chile. Ya se han establecido más de 60 hectáreas de ensayos comerciales, que constituyen la base para escalar a miles de hectáreas en el corto/mediano plazo.

La meta es aún mayor: 200.000 hectáreas cultivadas en Aysén y Magallanes, suficientes para reemplazar hasta la mitad de las importaciones. Estas regiones poseen suelos disponibles, baja presión por otros usos y condiciones climáticas ideales para oleaginosas y leguminosas de alto rendimiento.

Pero producir materia prima no es suficiente. El programa también ha desarrollado procesos industriales capaces de generar concentrados proteicos vegetales sobre 60% de proteína y aceites vegetales de alta calidad, todo validado en dietas reales de salmón y trucha con resultados equivalentes a insumos importados.

Esto significa que ya no hablamos de un sueño o una idea, sino de una tecnología probada, real y con impacto medible.

3. El beneficio ambiental: reducir emisiones, riesgos y distancias

La producción local de insumos vegetales tiene un efecto ambiental inmediato y profundo.

Primero, evita miles de kilómetros de transporte marítimo. Cada año se mueven más de 800.000 toneladas de materias primas vegetales hacia Chile; sustituir la mitad permite eliminar más de 1,5 millones de toneladas-kilómetro de navegación intercontinental.

Segundo, reduce el transporte terrestre en países exportadores, donde la carga suele recorrer entre 250 y 600 km en camión, tramo que posee una huella de carbono más alta que el transporte marítimo.

Tercero —y fundamental— elimina el riesgo asociado al cambio de uso de suelo en zonas como el Cerrado. Allí, la soya puede tener una huella 6 a 10 veces mayor que la soya cultivada en tierras históricamente agrícolas. Producir en Chile, en terrenos ya definidos como aptos, elimina esta incertidumbre ambiental de manera total.

Además, al producir localmente es posible generar circularidad: lombricultura y compostaje de residuos, uso de subproductos, aprovechamiento energético regional y una reducción significativa del uso de embalajes y almacenamiento de larga distancia.

La ciencia también juega un rol clave. El PTEC INVA impulsa el desarrollo biotecnológico necesario para que los insumos vegetales cumplan con las exigencias nutricionales del salmón: concentracones proteicas superiores al 60% y presencia de EPA y DHA en aceites, ya sea mediante mejoramiento genético, edición genética o tecnologías de extracción avanzadas.

El resultado ambiental es un alimento más limpio, local y más trazable. Un alimento verdaderamente chileno.

4. El beneficio social: una nueva ola de trabajo en el sur

Producir en Chile lo que antes comprábamos afuera puede generar una revolución laboral y territorial. El cálculo es simple y contundente: por cada 1.000 hectáreas agrícolas permanentes se crean 25 a 40 empleos directos, más una cifra similar de empleos indirectos.

Si Chile cultiva 200.000 hectáreas, como propone en un inicio el PTEC INVA, el impacto sería:

- 5.000 a 8.000 empleos directos,
- 5.000 a 10.000 empleos indirectos,
- 10.000 a 18.000 nuevos empleos en total, principalmente en regiones tradicionalmente postergadas como Aysén y Magallanes.

Hablamos de trabajos en:

- Siembra, manejo y cosecha.
- Operación de maquinaria agrícola.
- Servicios logísticos y de transporte.
- Laboratorios y certificadoras.
- Plantas de procesamiento y extracción.
- Talleres mecánicos, ferreterías y servicios locales.
- Asesoría técnica, sanidad vegetal y manejo de suelos.
- Construcción de silos, de plantas procesadoras, etc.
- Construcción de caminos y carreteras.
- Servicios financieros, administrativos y contables.
- ... y un largo etcétera que implica levantar una industria completa.



Imagen 1: Día de Campo en Aysén, 2024. Una de las actividades recurrentes del PTEC INVA ha sido la difusión, capacitación y transferencia de tecnologías, actividades que son el principal componente de la Etapa 2 que está comenzando.

Además, los agricultores reciben algo esencial: certeza. La salmicultura es una industria intensiva y estable en demanda. Si se consolidan contratos de suministro de mediano y largo plazo, los agricultores pueden experimentar una estabilidad económica inédita, acompañada de tecnología, capacitación e inversión en infraestructura rural.

El PTEC INVA, en este sentido, no solo es un Programa Tecnológico; es una estrategia de desarrollo regional.

5. Imagen país, competitividad global y soberanía productiva

El mundo exige trazabilidad, carbono reducido, cadenas libres de deforestación y agricultura responsable. Chile, como uno de los mayores productores de salmón del planeta, debe responder a estas expectativas.

Hoy, los mercados de Estados Unidos, Europa y Japón observan con lupa:

- Uso de antibióticos.
- Bienestar animal.
- Huella de carbono.
- Origen de los insumos vegetales.

Poder decir, con evidencia y certificación, que el alimento del salmón chileno proviene en parte importante de agricultura nacional, baja en carbono y libre de cambio de uso de suelo, es una ventaja competitiva monumental.

Los beneficios son claros:

- Mejora la imagen interna de la industria.
- Fortalece su aceptación social.
- Abre puertas a certificaciones internacionales.
- Crea encadenamientos productivos entre agricultura y acuicultura.
- Reduce la dependencia estructural de países proveedores.

Es, en pocas palabras, soberanía productiva inteligente, basada en ciencia, innovación y trabajo rural.

El resultado final es una reducción estimada en 5% a 10% de la huella de carbono del salmón chileno, solamente por sustitución parcial de materias primas vegetales.

En este mismo sentido, ciertamente que la incorporación creciente de biotecnología es una cuestión fundamental. No olvidemos que la concentración proteica natural en los vegetales no supera un aproximado de 40%, y necesitamos llegar mínimo a 60% para tener las mejores opciones de inclusión en el pellet. Otro aspecto fundamental es lograr la presencia de ácidos grasos omega 3, especialmente EPA y DHA, en las oleaginosas y esto obliga a repensar, sin ideologismos, la posibilidad de hacer trasngénesis, y, alternativamente, emplear edición genética, tecnología que tiene la ventaja de no utilizar genes foráneos.

En cuanto al sembradío propiamente tal, estamos profundizando el conocimiento de lo que ocurre bajo el suelo, cómo aprovechar la existencia y función de los consorcios microbiológicos, dónde aplicar agricultura regenerativa, etc. Es decir, producir en Chile no sólo tiene implicancias directas sobre nuestros cultivos de salmónes sino que sobre un amplio universo de ciencias, tecnologías y actividades de I+D.

6. Una hoja de ruta para el futuro

Tras casi cuatro años de trabajo, el PTEC INVA ha demostrado que sí es posible producir en Chile concentrados proteicos y aceites vegetales de calidad para la salmonicultura; que sí es posible cultivar variedades de raps, camelina, lupino y arveja adaptadas al sur; y que sí es posible construir una cadena de valor que articule agricultores, centros de investigación, empresas tecnológicas e industria acuícola.

Para los próximos años, la hoja de ruta contempla:

- Ampliar la base agrícola a miles de hectáreas.
- Instalar plantas industriales de extracción.
- Avanzar en mejoramiento genético y biotecnología.
- Fortalecer modelos cooperativos con agricultores.
- Asegurar contratos de suministro estables.
- Seguir midiendo, con trazabilidad completa, el impacto real en emisiones.

El desafío es grande, pero la oportunidad es aún mayor.

Chile puede transformar una dependencia histórica en una ventaja competitiva única. Puede unir agricultura y acuicultura como nunca antes. Puede generar empleos reales y dignos en el extremo sur. Puede reducir la huella de carbono del salmón chileno y posicionarlo como un alimento verdaderamente sustentable. El PTEC INVA abre un camino claro: alimentar al salmón chileno con insumos vegetales chilenos.

Y ese camino no solo es posible; es urgente, es estratégico. Y es profundamente transformador para el país.



Imagen 2: Lupino blanco en INIA Kampenaike, Aysén.

CAMBIO GENERACIONAL Y GOBERNANZA DE LA ACUICULTURA: REFLEXIÓN ESTRATÉGICA



Marcelo Campos Larraín

Acuasesorías Ltda.
Avda. 1 Norte 1431, Viña del Mar
acuasesorias@acuasesorias.cl

Hemos llegado al 2026 y en mi caso, por “los amplios pasillos de la Acuicultura”, he visto pasar a numerosas personas. La mayoría, afortunadamente, aún transitan activamente aportando a esta trascendente actividad, pero también hay muchos que se encuentran retirados y dedicados a otras actividades o simplemente descansando después de largos años de entrega. A su vez, hay otros que se nos han adelantado y gozan de la vida eterna, espacio hacia donde inexorablemente todos nos dirigimos; considero que esta es una adecuada instancia para efectuar un especial reconocimiento a todos ellos.

Esto necesariamente nos debe llevar a la reflexión. Los grandes precursores de la acuicultura nacional han comenzado a retirarse y se está produciendo el llamado “cambio generacional”. Estamos viviendo la sustitución progresiva de una generación por otra, lo cual trae consigo una transformación de actitudes, normas, tecnologías y comportamientos sociales y laborales, que impactan en la cultura, el liderazgo y las dinámicas de las organizaciones.

Este es un proceso muy especial que tiene que ser desarrollado con mucha delicadeza y conocimientos. Es un proceso que, sumado a las prácticas de cariño y agradecimientos, requiere de adaptación, fusionando la experiencia de los mayores con la motivación, innovación y nuevas visiones de los jóvenes.

La acuicultura nacional tiene una historia¹⁻¹⁴ que necesariamente debe ser transmitida; una historia que no puede ser olvidada ni menos soslayada, afirmando que la mayor parte de las cosas fueron improvisadas o mal realizadas.

Siempre ha primado el “bien país” que, bajo el concepto de bienestar social y común, ha pretendido alcanzar un estado general de satisfacción y calidad de vida de la sociedad, garantizándose a todos los ciudadanos y especialmente de los que habitan en la zona sur austral del país, las condiciones necesarias para una vida digna, con acceso a servicios básicos, igualdad de oportunidades y cohesión social.

No podemos olvidar lo que eran tantas localidades sureñas antes de la llegada de la salmonicultura; la pobreza era casi extrema y las oportunidades en materia de salud, educación y vivienda prácticamente mínimas.¹⁵

Muchos índices económicos y de crecimiento se basan en las fuentes de empleo que la acuicultura genera, porque reflejan la salud de la economía y su impacto en el crecimiento sostenible.¹⁶

No obstante, no es sólo el empleo directo el importante; el más trascendente, significativo y poderoso, pues fortalece las economías locales, genera encadenamientos productivos y que promueve el desarrollo sostenible, es el empleo indirecto. A su vez, es preciso reconocer que mientras más indirecto sea, más potencia a la actividad principal, como lo es la acuicultura. El impacto de las actividades indirectas, entre otros, se manifiesta en el efecto multiplicador, la creación de servicios especializados y la innovación periférica. Es esta red sólida de servicios indirectos, también denominada “industria auxiliar”, la que actúa como una infraestructura de soporte, que permite a la acuicultura escalar en volumen y calidad.

Así las cosas, la acuicultura nacional, es un motor económico clave que además de impulsar el crecimiento a través de la generación de empleos para hombres, mujeres y jóvenes, también contribuye significativamente al Producto Interno Bruto (PIB), fortalece a pequeñas y medianas empresas (proveedoras de servicios, insumos y tecnología) y aporta estabilidad y desarrollo a las comunidades donde se asienta.

En términos económicos y en relación con el crecimiento sostenible, cabe recordar que la acuicultura refleja la salud económica mediante su eficiencia y baja huella ambiental en comparación con otras industrias generadoras de proteínas. Emite solo el 0,49% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero¹⁷ (mucho más eficiente que la ganadería), requiere menos recursos naturales para producir un kilogramo de proteína que otras fuentes animales¹⁸ (se alinea con los Objetivos de

Desarrollo Sostenible de la ONU), se enfoca en sistemas inteligentes y la optimización genética¹⁹ para garantizar que el crecimiento sea responsable y resiliente ante el cambio climático.

La experiencia nos indica que en el corto plazo se debe promulgar una nueva y moderna Política Nacional de Acuicultura. A su vez, para medir con precisión el estado y potencial de la acuicultura nacional, debiéramos trabajar en la efectiva implementación de una visión multidimensional como es el Índice de Agregación Acuícola General (IAGA)²⁰ que integra factores como eficiencia, rentabilidad, I+D y variables socioculturales y ambientales, como una herramienta técnica indispensable para la toma de decisiones estratégicas.

A pesar de no estar de acuerdo con seguir hipertrofiando la estructura estatal, es fundamental que las nuevas autoridades gubernamentales revisen pronto la gobernanza de la acuicultura. ¿Cómo es posible que el segundo motor económico del país no esté debidamente representado por un Ministro de Estado? Si la idea es propender al minimalismo estatal y contar con un "Estado eficiente", se deben fusionar o eliminar Ministerios, para así dar paso a la creación de un Ministerio de Acuicultura, Pesca y Ordenamiento del Maritorio. Siempre decimos que Chile es un país marítimo, con un tremendo potencial, pero no lo demostramos, pues falta mayor compromiso político y social para desarrollar plenamente su vocación oceánica, superando la desconexión entre el discurso y la práctica.

En definitiva, lo que no es posible aceptar es que los detractores de la acuicultura se aprovechen, entre muchas otras cosas, de la falta de una adecuada gobernanza y del cambio generacional tanto en la industria como en la comunidad, para instaurar una narrativa de rechazo absoluto hacia la producción intensiva, apelando a la mayor sensibilidad ambiental de los jóvenes.

Esto corresponde a un fenómeno sociopolítico en que se utilizan las brechas generacionales para modificar la percepción pública de la acuicultura nacional, argumentando:

1. Instrumentalización de la sensibilidad ambiental: Las nuevas generaciones tienen una formación donde la sostenibilidad no es opcional, sino un requisito ético. Los detractores aprovechan esto para presentar la producción intensiva como un modelo arcaico e inherentemente destructivo, omitiendo los avances innegables en economía circular o control de patógenos.

2. Desconexión histórica: Al haber un recambio generacional, se pierde la memoria del impacto económico positivo que la industria tuvo en comunidades aisladas, así como la diversificación de las economías locales a través de la existencia de un cluster de la acuicultura (con todos los beneficios económicos que aquello conlleva). La narrativa de rechazo se enfoca en el "daño presente" sin considerar la evolución tecnológica y regulatoria que ha tenido la actividad frente a sus errores del pasado.
3. Simplificación del mensaje: La narrativa de "rechazo absoluto" es más fácil de comunicar en plataformas digitales que la complejidad técnica de una "producción responsable". Esto crea un sesgo donde cualquier defensa de la industria se percibe como desactualizada, cómplice o, peor aún, retrógrada.

Con esto se está librando una batalla cultural, donde la acuicultura no solo debe validar su técnica, sino también su licencia social ante un público joven que es más propenso a creer en relatos de preservación total que en modelos de desarrollo productivo sostenible. Faltan conocimientos, se confunden conceptos y se rechazan muchos términos y prácticas.

De esta manera es como se generan prácticas ineficaces y sesgadas, como es lo que ocurre, entre muchas otras cosas, con la Ley Lafkenche (Ley N° 20.249), que crea los Espacios Costeros Marinos de los Pueblos Originarios (ECMPO)²¹ en Chile, la cual es el prototipo moderno de la "Ley del perro del hortelano" (quien no aprovecha algo, pero tampoco permite que otros lo hagan) y de la "Ley del chaqueto" (tendencia a criticar, envidiar o desacreditar a alguien que destaca o tiene éxito, atribuyéndolo a la suerte o a arreglos, en lugar de reconocer méritos, frenando la innovación y la confianza social).

Es oportuno tener confianza en que las futuras generaciones abolirán estas conductas culturalmente corrosivas, que no tienen fundamentos y se limitan solo a cuestionar el éxito, basado en trabajo y esfuerzo, complementado con mérito, dedicación y sacrificio de muchos chilenos y extranjeros que han dado lo mejor de sí para tener una acuicultura cada día más sustentable, sostenible, sana, saludable y segura.

En síntesis, la transición hacia una acuicultura moderna y sostenible debe estar fundamentada en un cambio generacional que abraza la historia, la tecnología y la sostenibilidad, acompañada de una gobernanza robusta e inclusiva, capaz de responder a los desafíos de lo que resta del siglo XXI y así asegurar el futuro del sector. Interesante desafío para las nuevas autoridades gubernamentales.



"No se puede amar lo que no se conoce, ni defender lo que no se ama."

Leonardo Da Vinci

REFERENCIAS

1. Arana Espina, Patricio. 2023. Pescadores Precolombinos. Salesianos Impresores S.A. ISBN 978-956-416-547-9. 503 pp.
2. Basulto del Campo, Sergio. 2003. El largo viaje de los salmones. Una crónica olvidada. Propagación y cultivo de especies acuáticas en Chile. Impresiones Maval Ltda. ISBN 956-291-512-3. 300 pp.
3. Basulto del Campo, Sergio. 2014. Noticias Pesqueras de Cinco Siglos. Chile (1520-2000). Ocho Libros Editores. ISBN 978-956-335-196-5. 512 pp.
4. Dazarola Metzger, Gabriel. 2019. Historia de la Piscicultura Río Blanco, Escuela de Ciencias del Mar, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile. 203 pp.
<https://www.pucv.cl/uuaa/site/docs/20221129/20221129115109/document.pdf>.
5. Henríquez Canessa, Nedda (ed.). 1998. Estado de situación y perspectivas de la acuicultura en Chile. Instituto de Fomento Pesquero (IFOP). ISBN 956-7470-03-0. 195 pp.
6. Méndez, Ricardo y Munita, Clara. 1989. La salmonicultura en Chile. Editado por Fundación Chile. Derechos reservados Inscripción N° 71.735. Impresos Lahosa. 260 pp.
7. Montanari, Mario (ed.). 2005. Chile país oceánico. Ocho Libros Editores Ltda. ISBN 956-8018-18-2. 396 pp.
8. Montecino, Vivian y Oliva, Doris. 2025. Dos mujeres en un océano de historias y un mar de cambios. Andros Impresores. ISBN 978-956-19-1343-1. 646 pp.
9. Muena Rodríguez, Alfonso. 2024. Se hace salmón al andar. Memorias de un salmonero. RPI 2024-A-331. 212 pp.
10. Sievers Czischke, Hellmuth. 2018. La Oceanografía en Chile. Historia de un desarrollo imperativo. Comité Oceanográfico Nacional, Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. ISBN 978-956-235-030-3. 266 pp.
11. Vera Bahamonde, Héctor. 2010. La crisis del salmón. ¿Por qué falló el tercer motor de la economía chilena? RIL Editores. ISBN 978-956-284-752-0. 194 pp.
12. Vergara, Margarita (ed.). 2004. La Acuicultura en Chile. TechnoPress S.A. Impresor Quebecor World Chile S.A. ISBN 956-8042-02-4. 336 pp.
13. Werlinger, Camilo (ed.). 2004. Biología Marina y Oceanografía. Conceptos y Procesos. Consejo Nacional del Libro y la Lectura – Universidad de Concepción. Trama Impresores S.A., Chile. ISBN 956-8436-00-6. 700 pp.
14. Yáñez, Eleuterio. 2003. Actividad pesquera y de acuicultura en Chile. Ediciones Universitarias de Valparaíso. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. ISBN 956-17-0346-7. 444 pp.
15. Martínez, Carlos. 2003. El ejemplo de Chiloé. Configuración social y demográfica de la industria. En: Salmonicultura en el Sur de Chile. Compendio Revista Salmonicultura. Diario El Llanquihue. pp 54-58.
16. Garlock, T.M., Asche, F., Anderson, J.L. et al. 2024. Environmental, economic, and social sustainability in aquaculture: the aquaculture performance indicators. Nat Commun 15, 5274. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49556-8>.
17. MacLeod, MJ, Hasan, MR, Robb, DHF et al. 2020. Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture. Sci Rep 10, 11679. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68231-8>.
18. Consejo del Salmón. 2025. Datos relevantes de la salmonicultura chilena. Una industria sostenible. https://www.consejodelsalmón.cl/wp-content/uploads/2025/04/Brochure-digital-CDS_Interactivo.pdf.
19. <https://www.mispecies.com/noticias/La-aplicacion-de-la-Inteligencia-Artificial-en-la-acuicultura-como-tendencia-en-Aqua-2024/>.
20. Universidad Católica del Norte (UCN). 2005. Diagnóstico económico y social de la acuicultura. Proyecto FIP N° 2002-24. Informe Final. https://www.subpesca.cl/fipa/613/articles-89006_informe_final.pdf.
21. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=269291>.

La pesquería de jurel en el Pacífico Sur Oriental (1973-2025): Incluyendo el ambiente en la estimación del rendimiento máximo sostenido

Dr. Eleuterio Yáñez Rodríguez

Profesor Titular PUCV (j)
eleuterio.yanez@pucv.cl

RESUMEN

Se analiza la pesquería de jurel (*Trachurus murphyi*) en el Pacífico Sur Oriental desde 1973 al 2025, estimando rendimientos máximos sostenidos (RMS) de 994.353 toneladas y de 725.620 toneladas para el período interdecadal frío de 1999-2025, no considerando y considerando correcciones de la CPUE en el modelo seleccionado. En tanto que para el período interdecadal cálido de 1977-1998 se estiman RMS de 3,5 y 3,7 millones de toneladas, con las mismas consideraciones de la CPUE.

INTRODUCCIÓN

El jurel (*Trachurus murphyi* Nichols 1920) presenta una amplia distribución en el Pacífico Sur, desde el ecuador hasta el sur de Chile, llegando hasta Nueva Zelanda y Tasmania (Serra, 1991; Poulin et al., 2004). La Organización Regional del Pacífico Sur (OROP-PS) registra capturas de jurel desde 1970, para los 16 países (incluida la Unión Europea) que lo explotan en el Pacífico Sur Oriental (PSO) (SPRFMO SC12-Report, 2024). Estas cifras indican un máximo de 4.955.186 t en 1995, disminuyendo dramáticamente a 353.120 t en 2013 y aumentando a 1.296.740 t en 2024 (Tabla 1). Los desembarques de Chile representan el 73% de las capturas totales registradas para el PSO entre 1970 y 2024. De este desembarque realizado en Chile, la mayor parte se realiza en la zona central del país (84%), principalmente por la flota industrial (SERNAPESCA, 2008 - 2024).

Para garantizar la sostenibilidad de la pesca y salvaguardar el ecosistema marino, el manejo de esta pesquería en el Pacífico Sur Oriental lo realiza oficialmente la OROP-PS. La pesca de jurel en esta región es realizada por flotas cerqueras de zonas costeras de Chile, Perú y Ecuador, y por flotas arrastreras pelágicas de aguas lejanas de diversos países que operan más allá de la ZEE de los estados costeros. Así, la OROP-PS utiliza un modelo estadístico de captura por edad para evaluar la población de jurel (SPRFMO SC12-Report, 2024).

En el presente trabajo se estiman rendimientos máximos sostenidos del jurel considerando, además del esfuerzo de pesca, la variabilidad ambiental. El trabajo plantea la hipótesis de que con la inclusión de la variabilidad ambiental se pueden lograr resultados diferentes en las evaluaciones del recurso.

MODELO DE PRODUCCIÓN

Se analiza la pesquería de jurel realizada en el PSO entre 1973 y 2025, considerando la hipótesis de una sola unidad de stock, y tomando en cuenta: 1) la captura (C) de todos los países que explotan el recurso en el PSO; 2) el índice de abundancia captura por unidad de esfuerzo de pesca (CPUE), deducido de los registros de la flota industrial de cerco de la zona centro-sur de Chile; 3) el esfuerzo de pesca ($E = C/CPUE$); y 4) la temperatura superficial del mar (TSM) registrada por la NOAA entre los 32° S - 42° S y 71° W - 80° W (Tabla 1). Cabe señalar que las capturas de la zona central de Chile representan el 62% del total capturado en el PSO entre 1970 y 2024, resultando bastante representativas.

Payá (2025) señala que las capturas comerciales y los estudios acústicos en la zona central de Chile muestran que el jurel ha estado altamente concentrado en las aguas costeras durante los últimos años. La CPUE podría verse afectada por este elevado aumento de la concentración del recurso y recomienda, entonces, precaución al utilizar este índice que estaría sobreestimando su abundancia. Por tal motivo, utilizó una relación lineal entre la CPUE y el área de distribución del recurso para corregir la CPUE del 2000 al 2025. Este índice lo utilizamos para corregir nuestras estimaciones de CPUE, estimadas como: capturas en toneladas (t), divididas por la capacidad de bodega desplazada de la flota (CBD) y por la duración promedio del viaje de pesca (DPFP), mostrando una situación bastante menos optimista que la que muestra la CPUE sin corrección.

En el análisis se ajustan modelos globales de producción que consideran la variabilidad ambiental (Fréon et al., 1993; Fréon & Yáñez, 1995), utilizando la versión del programa CLIMPROD 5.0 de 2021 (www.researchgate.net/publication/350399949). Las estimaciones del rendimiento máximo sostenido (RMS) se realizan no considerando y considerando las correcciones de CPUE; dichas estimaciones se hicieron para el período interdecadal cálido de 1977-1978 (de un promedio anual de 13,7540 °C) y del período interdecadal frío de 1979-2024 (de un promedio anual de 12,9491) (Tabla 1). Este último incluye el período de 2015-2017, de sucesivos fenómenos "El Niño" (Garreaud, 2018).

Tabla 1: Capturas, esfuerzo de pesca y TSM-NOAA en el PSO (1973-2025). (Datos de entradas de CLIMPROD)

Años	Capturas (t)	Esfuerzos de pesca (CBD*DPFP/1000)	TSM-NOAA (°C)
1973	164.376	3.210	13,117
1974	322.723	8.583	13,208
1975	299.104	3.920	13,294
1976	396.458	3.505	13,297
1977	848.071	5.609	13,678
1978	1.024.764	4.581	13,774
1979	1.301.611	5.047	13,856
1980	1.316.363	4.925	13,939
1981	1.944.670	4.572	13,831
1982	2.371.611	5.217	13,916
1983	1.870.262	3.051	13,979
1984	2.686.902	5.005	13,466
1985	2.370.934	4.701	13,742
1986	2.072.848	5.056	13,629
1987	2.679.764	5.362	14,022
1988	3.245.699	7.290	13,467
1989	3.547.077	8.717	13,723
1990	3.714.757	10.464	13,463
1991	3.777.618	10.338	13,502
1992	3.361.674	10.388	13,54
1993	3.369.598	12.240	13,588
1994	4.274.793	15.792	13,898
1995	4.955.186	18.224	13,711
1996	4.378.844	18.117	13,761
1997	3.597.117	20.865	13,981
1998	2.025.758	14.216	13,924
1999	1.423.447	9.477	13,068
2000	1.540.318	9.681	12,757
2001	2.527.725	14.502	12,929
2002	1.750.077	12.170	12,765
2003	1.797.229	13.523	13,193
2004	1.934.411	12.610	13,297
2005	1.754.673	12.110	13,088
2006	2.020.136	13.477	13,099
2007	1.996.975	18.056	12,213
2008	1.472.631	22.938	13,242
2009	1.283.473	19.242	12,953
2010	726.573	15.795	12,337
2011	634.125	22.728	12,721
2012	454.746	9.187	13,12
2013	355.539	8.911	12,927
2014	415.366	10.989	12,827
2015	395.210	10.710	13,527
2016	389.101	7.585	13,889
2017	406.126	5.174	13,556
2018	527.539	6.341	13,514
2019	635.569	5.314	13,188
2020	725.945	3.400 (10.622)**	12,843
2021	802.048	3.825 (12.518)**	12,592
2022	961.428	4.431 (14.068)**	12,764
2023	1.134.612	5.014 (18.973)**	12,656
2024	1.296.740	6.522 (20.239)**	11,928
2025	1.228.931*	5.794* (17.982)**	12,632

* Valor por confirmar

** Estimado con CPUE corregida

RESULTADOS

Para ajustar los modelos CLIMPROD se consideran 5 clases de edad participando significativamente en las capturas (SPRFMO SC12-Report, 2024), el reclutamiento a los 2 años y el ambiente afectando la abundancia principalmente entre 0 y 2 años (Espíndola et al., 2016. Así, para la pesquería del período 1973-2025 se ajusta el siguiente modelo, sin considerar las correcciones de CPUE antes mencionadas:

$$CPUE = ((a \text{ TSM}^b) + d \text{ E})^{(1/c-1)} \quad (1)$$

$R^2 = 0,84$ ($p < 0.01$); R^2 Jackknife = 0,81; test Jackknife = bueno para los cuatro parámetros del modelo: $a = 0,00862$ ($p < 0.01$), $b = 2,07888$ ($p < 0.01$), $c = 1,010920$ ($p < 0.01$) y $d = -1,2580 \text{ E-}5$ ($p < 0.05$)

Este ajuste incorpora una relación no lineal entre CPUE y TSM, dentro del modelo de producción generalizado de Pella y Tomlinson (1969). Con el fin de tener una aproximación de la contribución relativa de ambas variables explicativas, se ajustan el modelo exponencial (dado que el valor de c en el modelo (1) queda cerca de 1) $CPUE = a \exp(b * E)$ ($R^2 = 0,38$) y el modelo lineal $CPUE = a + b \text{ TSM}$ ($R^2 = 0,56$), mostrando una relevancia mayor la TSM.

El modelo (1) se ajusta ahora tomando en cuenta las correcciones de las CPUE antes mencionadas y los resultados son muy parecidos:

$R^2 = 0,86$ ($p < 0.01$); R^2 Jackknife = 0,84 ; test Jackknife = bueno para los 4 parámetros del modelo ($p < 0.01$): $a = 0,03298$, $b = 1,43510$, $c = 1,05517$ y $d = -4,2009 \text{ E-}6$. En este caso las contribuciones relativas de ambas variables fueron: $CPUE = a \exp(b * E)$ ($R^2 = 0,48$) y $CPUE = a + b \text{ TSM}$ ($R^2 = 0,64$).

Los rendimientos máximos sostenidos (RMS) se calculan como los máximos de las curvas de equilibrio, estimadas considerando como constantes las TSM promedios anuales de los dos períodos interdecadales, obteniendo los siguientes resultados:

Sin correcciones de CPUE:

3.503.980 t (13,7450 °C, promedio anual del período 1977-1998)
994.353 t (12,9491 °C, promedio anual del período 1999-2025)

Con correcciones de CPUE:

3.730.754 t (13,7450 °C, promedio anual del período 1977-1998)
725.620 t (12,9491 °C, promedio anual del período 1999-2025)

COMENTARIOS

Si se toma el promedio anual de TSM-NOAA más alto del período 1948-2025 (14,022 °C en 1987), el RMS sería de 5.340.022 t con el modelo sin correcciones de CPUE y de 6.451.085 t con correcciones de CPUE. Este sería un dato muy puntual de la TSM, no representando períodos como los interdecadales antes señalados. Además, estos valores de RMS son mayores a la máxima captura registrada para esta pesquería, de 4.955.186 t en 1995. Cabe señalar que, considerando también la hipótesis de una sola unidad de stock, la OROP-PS estima un RMS de 7.164 t para el 2023 (SPRFMO SC11-Report, 2023).

La Comisión de la OROP-PS adoptó para el 2025 una captura total permisible de jurel que no sobrepase 1.428.000 t (SPRFMO SC12-Report, 2024). Sin embargo, con base en los patrones de captura estacional de los últimos cinco años, se proyecta provisionalmente que la captura total de 2025 será de 1.040.538 toneladas, lo que representaría una disminución del 19,8 % con respecto al total de 2024; esta proyección se ajustará a medida que se disponga de nuevos datos mensuales (SPRFMO SC13-Report, 2025). Recordar que para el período 1999-2025 en este trabajo se estima un RMS cercano o menor a un millón de toneladas para el período interdecadal frío de 1999 al 2025, dependiendo si o no se consideran correcciones de CPUE en el modelo de producción seleccionado (1). Para los ajustes del modelo (1), en este trabajo estimamos para el 2025 una captura total de 1.228.931 t, deducida de las capturas totales realizadas a julio de este año más las capturas de agosto a diciembre de 2024, la que deberá confirmarse. No obstante, la Secretaría de la OROP-PS informa el 20 de enero de 2026 una nueva proyección de la captura total en el PSO para el 2025, equivalente a 1.419.119 t (SPRFMO Monthly Catch Report, December 2025, G05-2026).

El jurel implicó en el PSO capturas cercanas a 5 millones de t en 1995, que caen a 402.681 t de promedio anual en el período 2012-2017, aumentando a 914.102 t anuales en el período 2018-2025 (Tabla 1). El jurel se estaría recuperando de una importante sobre-explotación, asociada a cambios interdecadales del ambiente. Los eventos ambientales también influirían en la abundancia del jurel y probablemente en su disponibilidad, durante los cuales se observan los residuos mayores de nuestro modelo. En el presente trabajo se analizan las fluctuaciones temporales de las variables tomadas en cuenta; sería recomendable incluir otras variables (Naranjo et al., 2015) y la dimensión espacial en el desarrollo de los análisis de esta pesquería, incluyendo por supuesto el cambio climático (Silva et al., 2015, 2016).

REFERENCIAS

Espíndola, F., Quiroz, J.C., Wiff, R., Yáñez, E. 2016. Incorporating sea surface temperature into stock-recruitment relationship: Application to jack mackerel (*Trachurus murphyi*) off Chile. *Revista de Biología Marina & Oceanografía*. Vol. 51 (1): 137-145.

Fréon, P., G. Pichon, C. Mullon. 1993. CLIMPROD: experimental interactive software for choosing and fitting surplus production models including environmental variables. *FAO, Computerized Information Series Fisheries* 5, 76 pp.

Fréon, P., Yáñez. 1995. Influencia del medio ambiente en evaluación de stock: una aproximación con modelos globales de producción. *Invest. Mar., Valparaíso*, 23: 25-47.

Garreaud, R. 2018. Tres Niños Sorprendentes. Departamento de Geofísica, Universidad de Chile. *Boletín Técnico*, Vol. 5, N° 1, 9 páginas

Naranjo, L., F. Plaza, E. Yáñez, M. Á. Barbieri, F. Sánchez. 2015. Forecasting of jack mackerel landings in central-southern Chile through neural networks. *Fisheries Oceanography*, Vol. 24 (3): 219-228.

Payá, I. 2025. Update on the Chilean Jack Mackerel CPUE Index and Acoustic Biomass Estimates in Chile. 13th SPRFMO SC Meeting, SC13-JM04: 1-21.

Pella, J.J., P.K. Tomlinson. 1969. A generalized stock production model. *IATTC Bull.*, 13 (3): 419-496.

Poulin, E., L. Cárdenas, C.E. Hernández, I. Kornfield, F.P. Ojeda. 2004. Resolution of the taxonomic status of Chilean and Californian jack mackerel using mitochondrial DNA sequence. *Journal of Fish Biology* 65: 1160-1164.

SERNAPESCA. 1982-2024. Anuarios estadísticos de desembarque. Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura, Chile.

Serra, R. 1991. Important life history aspects of the Chilean jack mackerel *Trachurus symmetricus murphyi*. *Invest. Pesq. (Chile)*, 36: 67-83.

Silva, C., E. Yáñez, M. A. Barbieri, C. Bernal, A. Aranís. 2015. Forecasts of swordfish (*Xiphias gladius*) and common sardine (*Strangomera bentincki*) off Chile under the A2 IPCC climate change scenario. *Progress in Oceanography*, 134: 343-355.

SPRFMO SC11-Report. 2023. Annex 7. Jack Mackerel Technical Annex. Scientific Committee, South Pacific Regional Fisheries Management Organisation (SPRFMO), 114 pp.

SPRFMO SC12-Report. 2024. Annex 7. Jack Mackerel Technical Annex. Scientific Committee, South Pacific Regional Fisheries Management Organisation (SPRFMO), 94 pp.

SPRFMO SC13-Report. 2025. C13-JM 01_rev 2 (10 Sept) Catch history of *Trachurus murphyi*, summary to 2024 and 2025 year-to-date. Scientific Committee, South Pacific Regional Fisheries Management Organisation (SPRFMO), 8 pp.

Nuestro Propósito

Aplicamos la ciencia y nuestro conocimiento
para crear soluciones confiables
que mejoren la alimentación del mundo,
entregando todos los días lo mejor de cada uno.



VETERQUIMICA®

www.veterquimica.cl

Síguenos



VETERQUIMICA®

LotaProtein

Part of TripleNine



Conservamos y
utilizamos de forma
sostenible los océanos
y los recursos
marinos.

HARINA PREMIUM

www.lotaprotein.cl

