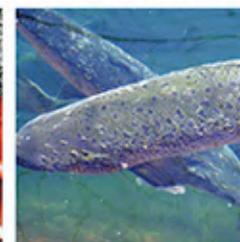
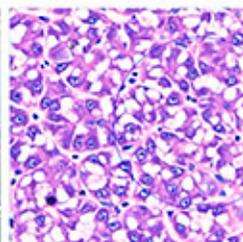


revista versión[®] diferente

Salmón-Acuícola



EFFECTOS DE LA SUSTITUCIÓN DIETARIA PARA SALUD DE SALMONES | USO TRATAMIENTOS PARA EL CONTROL DE CALIGUS EN CHILE | SMOLTVISON TEST (SRS) | MÉTODO DE PCR MÚLTIPLE *T. DICENTRARCHI* ANTÍGENO "0" | CARRAGENANO LAMBDA ANTIVIRAL IPNV | LAMP UN GEN, COLOR, UNA REVOLUCIÓN PARA *P. SALMONIS* | USO FITOGÉNICOS PARA LA ACUICULTURA | CAPAS FINAS DE FITOPLANCTON TÓXICO (FAN) | MICROALGAS DE NIEVE Y SU ROL DE LA CRÍOSFERA ANTÁRTICA | CENTRO FONDAP IDEAL | OCÉANOS, BIODIVERSIDAD Y MANEJO CON ENFOQUE ECOSISTÉMICO | FOTOLIASA, ENZIMA ALGAL | NUEVO ALIMENTO VIVO BASADO EN HUEVOS Y LARVAS DE PICOROCO | ROL DEL TRIGO EN LA ELABORACIÓN ALIMENTOS DE SALMONES



issuu

Distribución Gratuita Consérvela

LÍNEA AQUA

Comprometidos con la producción acuícola sustentable

DUPLALIM® AQUA / TONALIM® AQUA / VIRUCLIN® AQUA



www.veterquimica.cl

Síguenos   



VETERQUIMICA®



Año 22 - N°39
Edición Especial
 Primer Semestre 2025

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:

- Iván Gómez, UACH
- Matías Vera, VEHICE
- Pirjo Huovinen, UACH
- Mónica Imarai, USACH
- Sandra Bravo, UACH
- Mauricio Pineda, ULagos

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	14
Pharmaq Analytc	20
Plásticos Austral	29
Salmonicultores de Magallanes	34
AquaBC	42
Dimarine	77
Veterquímica	T2
Salmofood	T3
Lota Protein	T4

Contenidos

Indice de Universidades	2
Editorial	3
Fases Lunares	4
Ferias Internacionales	5
Ferriados Internacionales	6
EFFECTOS DE LA SUSTITUCIÓN DIETARIA DEL ACEITE DE PESCADO POR ACEITES VEGETALES SOBRE LA SALUD DE SALMONES	8
SMOLTVISION, CASO DE ESTUDIO; SINERGIA POSITIVA CON APLICACIÓN DE VACUNA ALPHA JECT LIVAC® SRS.	21
USO DE FITOGÉNICOS: COMPLEMENTO NATURAL PARA LA SALUD Y BIENESTAR ANIMAL EN ACUICULTURA	68
EL ROL DEL TRIGO EN LA ELABORACIÓN DE ALIMENTOS PARA SALMÓNIDOS: DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES PARA LA PRODUCCIÓN LOCAL SOSTENIBLE	78

INDICE DE UNIVERSIDADES

sus Estudios e Investigaciones

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE

- 15 EVOLUCIÓN EN EL USO DE TRATAMIENTOS ANTIPARASITARIOS PARA EL CONTROL DE CALIGUS EN CHILE
- 35 LAMP, UN GEN, UN COLOR, UNA REVOLUCIÓN PARA *Piscirickettsia salmonis*.
- 49 MICROALGAS DE NIEVE Y SU ROL EN LOS PROCESOS DE LA CRIÓSFERA ANTÁRTICA
- 53 CENTRO FONDAP - 10 AÑOS INVESTIGANDO EL OCÉANO AUSTRAL

UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

- 25 DESARROLLO DE UN MÉTODO DE PCR MÚLTIPLE PARA TIPIFICAR EL ANTÍGENO "O" DE AISLADOS DE *Tenacibaculum dicentrarchi*

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO

- 30 EL CARRAGENANO LAMBDA COMBATE EFICAZMENTE AL VIRUS DE LA NECROSIS PANCREÁTICA INFECCIOSA (IPNV) QUE INFECTA CÉLULAS DE SALMÓNIDOS

UNIVERSIDAD DE LOS LAGOS

- 43 CAPAS FINAS DE FITOPLANCTON TÓXICO: UN PROBLEMA QUE ESCAPA A LOS MÉTODOS TRADICIONALES DE DETECCIÓN
- 72 DESARROLLO DE UN NUEVO ALIMENTO VIVO BASADO EN HUEVOS Y LARVAS DEL CIRRIPEdio GIGANTE *Austromegabalanus psittacus* ("PICOROCO") PARA LA MEJORA PRODUCTIVA DE ESTADIOS TEMPRANOS DE PECES MARINOS

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO

- 58 OCÉANOS, BIODIVERSIDAD, EXPLOTACIÓN Y MANEJO CON ENFOQUE ECOSISTÉMICO

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

- 62 PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE FOTOLIASA, ENZIMA ALGAL REPARADORA DE ADN, PARA PRODUCTOS COSMÉTICOS

Editorial

Para la edición primer semestre Junio 2025, traemos una variedad de temas salmón-acuícolas tales como: Efectos de la sustitución dietaria del aceite de pescado por aceites vegetales sobre la salud animal; Uso tratamientos para el control de Caligus en Chile; Smoltvison test (SRS); Método de PCR múltiple *T. Dicentrarchi* Antígeno " 0 "; Carragenano Lambda antiviral IPNV; LAMP un gen, color, una revolución para *P. Salmonis*; Uso Fitogénicos para la acuicultura; Capas finas de Fitoplancton tóxico (FAN); MicroAlgas de nieve y su rol de la Criósfera Antártica; Centro FONDAP IDEAL; Océanos, Biodiversidad y manejo con enfoque Ecosistémico; Foto Liasa, Enzima Algal; Nuevo Alimento Vivo basado en huevos y larvas de Picoroco; Rol del Trigo en la elaboración alimentos de salmones.

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

Esperamos para la edición digital e impresa primer semestre 2025, 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 ajena a nuestra agenda de tiempo editorial para impresión.

Los invitamos a participar en próxima edición especial digital e impresa, segundo semestre 2025.

Queremos destacar a nuestro colaborador especial laboratorio de histopatología VeHiCe que organizó con gran éxito y concurrencia 4TH International Seminar Fish Pathology, Toxicology, Ras, and Animal Welfare abril 2025. Donde fuimos invitados para obsequiar la revista versión Diferente al público asistente al seminario internacional en la ciudad de Frutillar, Teatro del Lago.



FASES LUNARES 2025

	CRECIENTE	LLENA	MENGUANTE	NUEVA
				
ENERO	6	13	21	29
FEBRERO	5	12	20	27
MARZO	6	14	22	29
ABRIL	4	12	20	27
MAYO	4	12	20	27
JUNIO	2	11	18	25
JULIO	2	10	17	24
AGOSTO	1 - 31	9	16	23
SEPTIEMBRE	7	14	21	29
OCTUBRE	7	13	21	29
NOVIEMBRE	5	12	20	28
DICIEMBRE	4	11	19	27

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

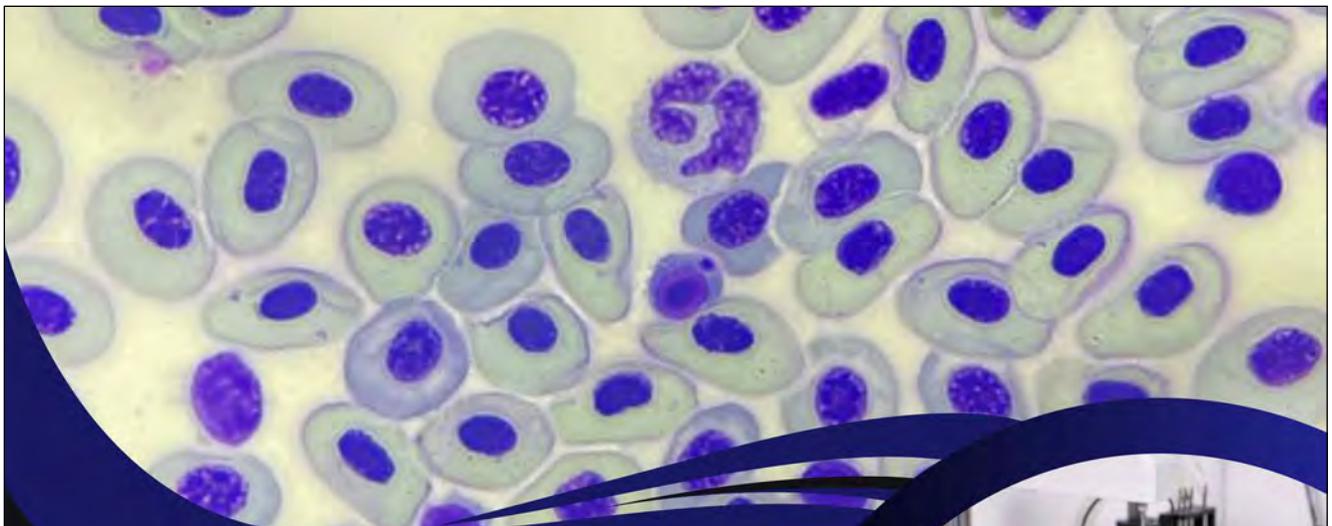
Ferias Internacionales 2025

JUNIO	08 → 11	AQUACULTURE CANADA CONFERENCE AND TRADE SHOW 2024 (APA)	Fredericton, New Brunswick - Canadá
	17 → 19	XIX CONGRESO NACIONAL DE ACUICULTURA	Las Palmas de Gran Canarias - España
	25 → 28	AQUACULTURE PHILIPINAS	Manila Philipinas
AGOSTO	19 → 21	AQUANOR 2025 - The industrys most important meeting place	Trondheim - Noruega
	20 → 22	JAPAN INTERNATIONAL SEAFOOD & TECHNOLOGY EXPO	Tokyo - Japón
	20 → 22	VIETNAM FISHERIES INTERNATIONAL EXIBITION	Vietnam - Asia
	27 → 29	WORLD SEAFOOD SHANGAI SIFSE	Shangai - China
SEPTIEMBRE	02 → 04	INNAQUA CONFERENCE 2025 AQUACULTURE INNOVATION	Puerto Varas - Chile
	03 → 05	EXPO PESCA & ACUIPERU	Lima - Perú
	03 → 05	INTERNATIONAL AQUACULTURE & FISHERIES EXPO TAIWAN	Taipéi - Taiwán
	10 → 12	SEAFOOD EXPO ASIA	Singapur
	10 → 12	ICELANDIC FISHING EXPO 2025	Sjávarutvegur - Islandia
	22 → 25	AQUACULTURE EUROPE 2025	Valencia - España
OCTUBRE	07 → 09	CONXEMAR	Vigo - España
	07 → 09	DANFISH INTERNATIONAL 2025	Aalborg - Dinamarca
	18	21 th INTERNATIONAL CONFERENCE HARMFUL ALGAE (ICHA) 2025	Puerto Varas - Chile
	20 → 23	AQUA EXPO GUAYAQUIL 2024	Guayaquil - Ecuador
	22 → 24	GLOBAL FISHERY FORUM & SEAFOOD EXPO RUSIA 2025	Saint Petersburg - Rusia
	29 → 31	CHINA FISHERIES OF SEAFOOD EXPO	Qingdao - China
NOVIEMBRE	05 → 07	BISFE BUSAN INTERNATIONAL SEAFOOD & FISHERIES EXPO	Busan - Korea
	12 → 16	SEAFOOD SHOW OF ASIA	Yakarta - Indonesia
	25 → 28	X CONGRESO NACIONAL DE ACUICULTURA	Iquique - Chile
	30 → 04	SEA LICE CONFERENCE 2025	Puerto Varas - Chile
DICIEMBRE	09 → 12	BALGA EUROPE 2025	Riga - Letonia

Feriados Internacionales 2025



		CHILE	CANADA	EEUU	NORUEGA	JAPON	ESCOCIA
Miércoles 1 Enero	Día de Año Nuevo	●	●	●	●	●	●
Lunes 13 Enero	Día de la Entrada a la Edad adulta					●	
Lunes 20 Enero	Día de Martin Luther King			●			
Martes 11 Febrero	Día de la Fundación					●	
Lunes 17 Febrero	Día de Los Presidentes			●			
Jueves 20 Marzo	Inicio Equinoccio Primavera					●	
Viernes 28 Marzo	Viernes Santo	●	●	●			●
Martes 29 Abril	Día de Emperador Showa					●	
Jueves 1 Mayo	Día Internacional del Trabajo	●			●		
Sábado 3 Mayo	Día de la Constitución					●	
Lunes 5 Mayo	Día Festivo de principio de mayo						●
Miércoles 21 Mayo	Día de las Glorias Navales	●					
Lunes 26 Mayo	Día de los caídos en la Guerra			●			
Lunes 26 Mayo	Día Festivo de Primavera						●
Jueves 29 Mayo	Día de la Ascensión				●		
Domingo 8 Junio	Domingo de Pentecostés				●		
Viernes 20 Junio	Día de los Pueblos Indígenas	●					
Domingo 29 Junio	Día de San Pedro y San Pablo	●					
Martes 1 Julio	Día de Canadá		●				
Viernes 4 Julio	Día de la Independencia			●			
Miércoles 16 Julio	Día de la Virgen del Carmen	●					
Lunes 21 Julio	Día del Mar					●	
Martes 5 Agosto	Fiesta del Verano						●
Lunes 11 Agosto	Día de la Montaña					●	
Viernes 15 Agosto	Día de la Ascensión de la Virgen	●					
Lunes 1 Septiembre	Día del Trabajo		●	●			
Lunes 15 Septiembre	Homenaje a las personas mayores					●	
Jueves 18 Septiembre	Día de la Independencia	●					
Viernes 19 Septiembre	Día de las Glorias del Ejército	●					
Martes 23 Septiembre	Equinoccio de Otoño					●	
Domingo 12 Octubre	Día del Encuentro de Dos Mundos	●		●			
Lunes 13 Octubre	Día de Acción de Gracias		●				
Lunes 13 Octubre	Día de la Salud y los Deportes					●	
Viernes 31 Octubre	Día de las Iglesias Protestantes y Evan.	●					
Sábado 1 Noviembre	Día de Todos los Santos	●					
Lunes 3 Noviembre	Día de la Cultura					●	
Martes 11 Noviembre	Día del Recuerdo		●				
Martes 11 Noviembre	Día de Los Veteranos de Guerra			●			
Domingo 23 Noviembre	Día de Acción de Gracias al trabajo					●	
Jueves 27 Noviembre	Día de Acción de Gracias			●			
Domingo 30 Noviembre	Fiesta de San Andrés						●
Lunes 8 Diciembre	Inmaculada Concepción	●					
Jueves 25 Diciembre	Navidad	●	●	●	●		●
Viernes 26 Diciembre	Día de San Esteban				●		●





VEHICE

SEGUIMIENTO Y MONITOREO DE PARÁMETROS SANGUÍNEOS

- Perfil Bioquímico Sanguíneo
- Hematología
- Gasometría Sanguínea
- Citología
- Monitoreo de Perfiles Sanguíneos de Estrés
- Status Fisiológico
- Evaluación de Estrés Oxidativo

Monitorea el Status Sanitario de tus peces con Herramientas de Patología Clínica (Cuadros de PRV, Mortalidades post transferencia, Monitoreos en RAS, Transportes, otros)



www.vehice.com Contacto: +56652710232 - info@vehice.com

EFECTOS DE LA SUSTITUCIÓN DIETARIA DEL ACEITE DE PESCADO POR ACEITES VEGETALES SOBRE LA SALUD DE SALMONES.



Matías Vera¹, Carlos Sandoval¹, Alexis Contreras¹, Edison Serrano²

¹ Veterinary Histopathology Center SpA

² Departamento de acuicultura Universidad Católica del Norte

Históricamente, el aceite de pescado ha sido la fuente primaria de lípidos en la acuicultura de salmónidos, valorado por su alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga omega-3 (LC-PUFAs), específicamente el ácido eicosapentaenoico (EPA) y el ácido docosahexaenoico (DHA) (Zhu et al., 2020). Estos LC-PUFAs son esenciales para el crecimiento, el desarrollo y la salud general de los salmónidos (Mellery et al., 2017). Además, confieren importantes beneficios nutricionales para los consumidores humanos, haciendo del salmón de cultivo una fuente relevante de estos nutrientes (Betancor et al., 2016).

En las últimas dos décadas, la sustitución de aceites de origen animal (principalmente aceite de pescado) por alternativas vegetales en la acuicultura de salmónidos ha sido objeto de amplia investigación (Qian et al., 2024). Esta transición responde

a una compleja interacción entre la necesidad económica, la sostenibilidad ambiental y los requerimientos biológicos de los peces, así como el valor nutricional del producto final para los consumidores. Los estudios iniciales destacaron la presión sobre el suministro de aceite de pescado y las ventajas económicas de los aceites vegetales (Turchini et al., 2019).

Si bien el reemplazo parcial o total del aceite de pescado con ciertos aceites vegetales a menudo no compromete significativamente el rendimiento del crecimiento en salmónidos como el salmón del Atlántico (*Salmo salar*) y la trucha arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*), diversos estudios sugieren que esta sustitución puede acarrear alteraciones significativas en procesos metabólicos y fisiológicos subyacentes (Qian et al., 2024).

El Dilema de los Aceites: Pescado vs. Vegetal

Característica	Aceite de Pescado (AP)	Aceites Vegetales (AV)
EPA y DHA	Alto contenido	Deficientes / Ausentes
Ácidos Grasos Omega-3 C18 (ALA)	Variable	Variable (alto en algunos como linaza)
Ácidos Grasos Omega-6 (LA)	Bajo	Variable (alto en algunos como soja, maíz)
Sostenibilidad	Oferta limitada, preocupación	Ampliamente disponibles, menor costo
Antioxidantes Naturales	Puede contener (e.g., astaxantina, Vit E)	Variable (e.g., tocoferoles), a menudo menor
Potencial Impacto Oxidativo	Menor (si fresco y bien manejado)	Mayor riesgo si no se suplementa/maneja bien

No Todos los Aceites Vegetales son Iguales

<p>Aceite de Soja</p> <p>Perfil AG: Alto en omega-6 (LA). Efecto Inmune Clave: Tiende a ser proinflamatorio (IL-1β ↑, PGE2 ↑).</p>	<p>Aceite de Linaza</p> <p>Perfil AG: Alto en omega-3 vegetal (ALA). Efecto Inmune Clave: Antiinflamatorio, potencia vías antivirales (interferón ↑).</p>	<p>Aceite de Palma</p> <p>Perfil AG: Alto en AGS/AGM, baja relación n-6/n-3. Efecto Inmune Clave: Modulador, menor inflamación, LTBS ↑, puede mitigar estrés oxidativo.</p>
<p>Aceite de Camelina GM</p> <p>Perfil AG: Produce EPA directamente. Efecto Inmune Clave: Reemplaza AP sin efectos adversos en salud general, fuente sostenible de EPA.</p>	<p>Aceite de Algas</p> <p>Perfil AG: Rico en EPA y/o DHA. Efecto Inmune Clave: Mejora salud general (mucosas), calidad del filete, fuente sostenible de EPA/DHA.</p>	<p>Aceite de Canola GM</p> <p>Perfil AG: Relación favorable n-6/n-3. Efecto Inmune Clave: Promueve las vías antiinflamatorias y antivirales, con menor alteración metabólica.</p>

ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

En el presente apartado se evalúa la literatura científica actual sobre los efectos del reemplazo parcial o total del aceite de pescado con diversos aceites vegetales en las dietas de salmónidos de cultivo, con un enfoque principal en el salmón del Atlántico y trucha arcoiris. El análisis cubrirá el impacto en parámetros clave de salud, los cuales están interconectados, de modo que cambios en la dieta pueden tener efectos en cascada en diferentes indicadores fisiológicos. Estos parámetros son: la composición de ácidos grasos, la respuesta inmune, la resistencia a enfermedades, las alteraciones histológicas (como la acumulación de lípidos en el hígado y cambios intestinales), el estrés oxidativo, los mecanismos de defensa antioxidante, la respuesta al estrés, los parámetros hematológicos y las alteraciones de la microbiota.

Figura 1: Marco conceptual del centro IDEAL que integra temas transversales y procesos ecosistémicos de la zona sub-Antártica y la Península Antártica.

La producción científica relacionada con la evaluación de la salud de los peces en respuesta al reemplazo de aceites en la dieta ha experimentado un crecimiento significativo y sostenido, con una notable aceleración en la última década. De un metaanálisis realizado se evidenció que hasta comienzos del 2022 se registraban más de 4.330 publicaciones en revistas de alto impacto que incluían dentro de sus fuentes especies de peces de cultivo y la frase “aceite vegetal” (Qian et al., 2024).

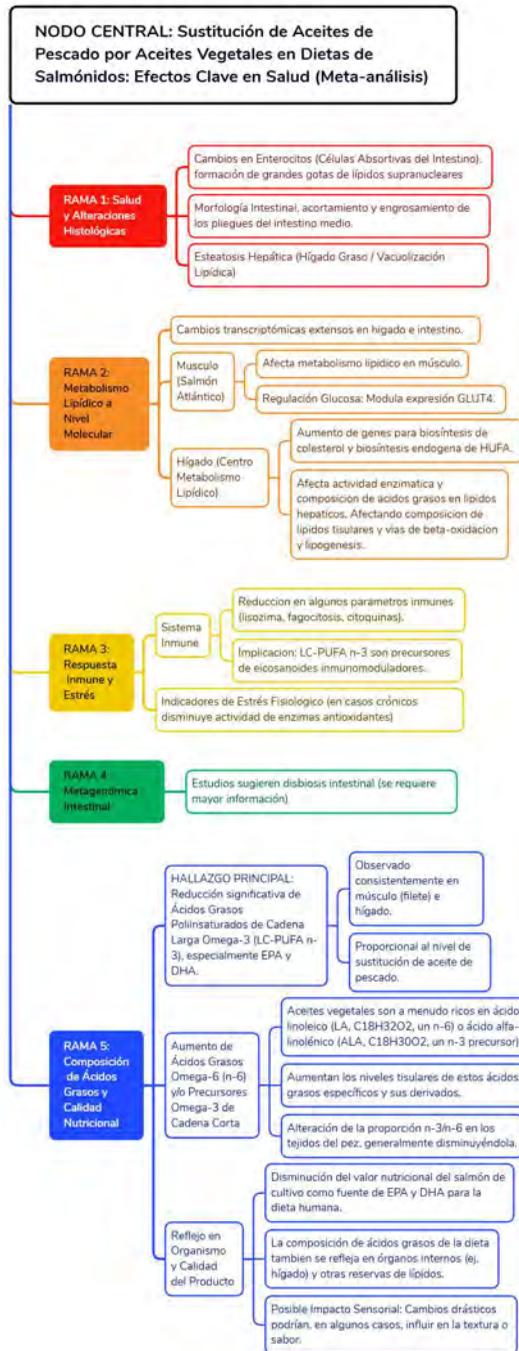


Figura 2: Diagrama de los principales resultados del meta-análisis de las publicaciones científicas sobre sustitución de los AP por AV en la dieta de los salmónidos.

1. Composición de ácidos grasos y calidad nutricional: Este es uno de los efectos más consistentes y significativos en los distintos estudios publicados. El reemplazo de AP por AV resulta en una reducción marcada de los niveles de ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga (LC-PUFA) omega-3, como el ácido eicosapentaenoico (EPA) y el ácido docosahexaenoico (DHA), en el músculo (filete) y el hígado de los salmónidos (Bell et al., 2004 ; Bell et al., 2010; Leaver et al., 2011; Usak & Tufan, 2018; Yildiz et al., 2017). Esta reducción se ha observado con aceites como el de raps, girasol, soja y linaza. Los AV, que suelen ser ricos en ácido linoleico (un ácido graso omega-6), tienden a aumentar los niveles de ácidos grasos omega-6 en los tejidos de los peces, lo que puede resultar en una proporción omega-3/omega-6 menos favorable (Usak & Tufan, 2018; Yildiz et al., 2017). Esta alteración disminuye el valor nutricional del salmón de cultivo como fuente de EPA y DHA para los consumidores. La composición de ácidos grasos de la dieta se refleja directamente en los tejidos (Santigosa et al., 2022).

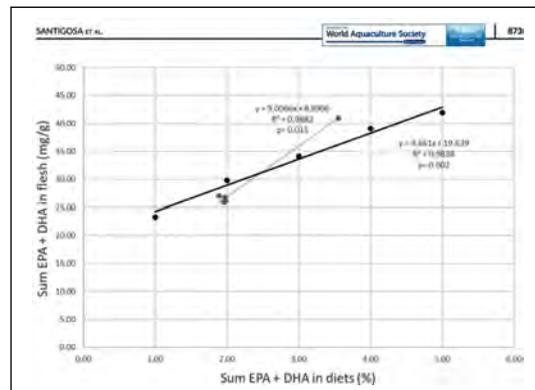


Figura 3: Niveles de EPA + DHA en músculo en relación con el contenido en la dieta en post smolt de Salmo salar (Santigosa et al.,).

2. Alteraciones histológicas y de la salud de los órganos: Se ha reportado un aumento en la acumulación de lípidos en el hígado (esteatosis hepática o vacuolización lipídica) en salmónidos alimentados con dietas ricas en ciertos AV, incluyendo aceite de soja, raps y linaza. La gravedad de esta esteatosis puede variar según el tipo y la proporción de AV (Torstensen et al., 2011; Lund et al., 2013). A nivel intestinal, se han observado cambios en la morfología, como el acortamiento de los pliegues en el intestino medio del salmón del Atlántico (Penn et al., 2014), lo cual puede estar relacionado con la sustitución de AV o el uso de harina de soja.

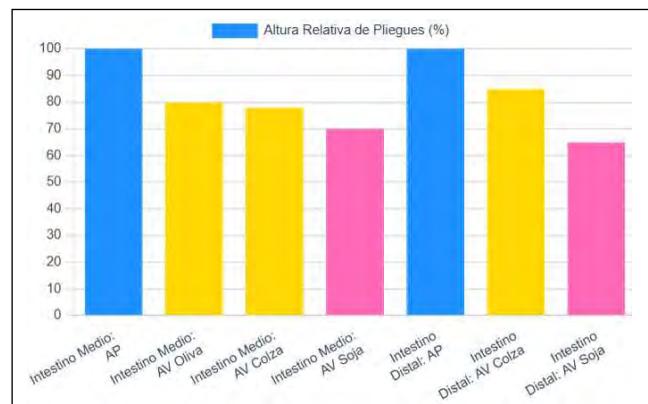


Figura 4: Alteraciones en pliegues intestinales, por reemplazo de AP por AV (Penn et al., 2014).

Alteraciones en Pliegues Intestinales

Estudios (Penn et al., 2014) muestran que el reemplazo del 80% de AP por AV (oliva, colza, soja) causa un acortamiento significativo de los pliegues en el intestino medio del salmón del Atlántico. El aceite de soja muestra efectos más pronunciados en el intestino distal en comparación con el aceite de colza.

3. Metabolismo lipídico a nivel molecular:

La sustitución de aceites de pescado (AP) por aceites vegetales (AV) induce adaptaciones significativas en el metabolismo lipídico de los salmónidos a nivel molecular. Estudios de transcriptómica y proteómica han demostrado una regulación diferencial de numerosos genes y proteínas en tejidos clave como el hígado y el intestino (Jin et al. 2020). Se ha observado, por ejemplo, un aumento en la expresión de genes asociados a la biosíntesis de colesterol (SREBP) y una respuesta consistente en la regulación al alza de los genes clave ($\Delta 5fad$, $\Delta 6fad$, *elovl2*, *elovl5b*) de la ruta biosintética de ácidos grasos altamente insaturados (HUFA), lo que representa un esfuerzo compensatorio del pez para intentar sintetizar LC-PUFA n-3 a partir de los precursores C18 disponibles en los AV (Geay et al., 2011; Morais et al., 2012; Leaver et al., 2008; Martínez-Rubio et al., 2013). El fondo genético es un factor importante que puede modular la respuesta de los salmónidos a las dietas con AV. El estudio de Jin et al. (2020) es fundamental en este aspecto, ya que demuestra que el salmón domesticado ha desarrollado mecanismos compensatorios más fuertes (mayor expresión de genes de síntesis de LC-PUFA y niveles más altos de LC-PUFA) cuando se alimenta con dietas AV.

Alteraciones del Metabolismo Lipídico Hepático

- Transporte de lípidos: Aumento de VLDL y TAG plasmáticos con reemplazos máximo de AP/HP, sugiriendo mayor exportación de lípidos desde el hígado (Torstensen et al., 2011).
- Síntesis de HUFA: Aumenta la actividad de desaturación/elongación para producir EPA/DHA a partir de precursores C18 (Tocher et al., 2003).
- Expresión Génica: Se afectan vías del metabolismo del colesterol y lipoproteínas, con interacciones genotipo-dieta (Leaver et al., 2008, 2013).

El hígado intenta compensar la dieta alterada, pero la sobrecarga puede llevar a esteatosis y predisponer a otros daños. La inflamación o estrés oxidativo histológico directo es menos reportado en estudios recientes, aunque los cambios metabólicos pueden precederlos

4. Respuesta inmune y resistencia a enfermedades:

La proporción de AGPI n-6/n-3 es un determinante crítico de la respuesta inmune: las dietas altas en n-6 (p.ej., aceite de soja) tienden a ser proinflamatorias, mientras que las fuentes vegetales altas en n-3 (p.ej., aceite de linaza) pueden ejercer efectos antiinflamatorios y potenciar vías antivirales (p.ej., señalización del interferón) (Holen et al., 2018; Caballero-Solares et al., 2024). Los AV impactan la expresión de una amplia gama de genes relacionados con la inmunidad (citoquinas, quimioquinas, enzimas en las vías de los eicosanoides, receptores de reconocimiento de patrones, enzimas antioxidantes) y la producción de mediadores lipídicos bioactivos (p.ej., PGE2, LTB5).

Inflamación y Función de Barrera.

- Respuesta Inmune: Aunque algunos estudios no hallan inflamación histológica clara, se observan alteraciones moderadas en ARNm de genes inmunitarios (Penn et al., 2014).
- Enteritis: Dietas basadas en plantas (con AV) pueden vincularse a enteritis, especialmente si se combina con ciertas proteínas vegetales (Sanden et al., 2023).
- Ácidos Grasos n-6: AV ricos en n-6 (ej. Soja) se asocian a mayor riesgo de colitis y pueden exacerbar eicosanoides proinflamatorios en salmónidos (Penn et al., 2014).
- Barrera Intestinal: Dietas con AV pueden comprometer la función de barrera y absorción, afectando la permeabilidad (Sanden et al., 2023).

5. Estrés oxidativo y mecanismos de defensa antioxidante:

La sustitución de AP por AV, especialmente si estos son ricos en ácidos grasos poliinsaturados (con más dobles enlaces que los LC-PUFA n-3 del AP), puede aumentar potencialmente la susceptibilidad a la peroxidación lipídica y el estrés oxidativo. Se ha observado que el reemplazo de AV afecta la actividad de enzimas antioxidantes (SOD, CAT, GSH-Px), aunque la dirección del cambio es variable (Peng et al. 2020). A nivel molecular, se ha demostrado que la expresión de genes antioxidantes y reguladores importantes, incluyendo aquellos de la vía Nrf2 y del metabolismo del glutatión, se ve afectada en el hígado de salmón Atlántico alimentado con dietas que contienen AV. Los niveles de daño por peroxidación lipídica, medidos como TBARS o MDA, pueden verse afectados por la inclusión de AV. En algunos casos, se ha observado un riesgo de aumento que puede ser mitigado por la suplementación con antioxidantes (Hamre et al. 2016).

Metabolismo y Estrés Oxidativo Intestinal.

- Metabolismo lipídico: Es la categoría más afectada. Puede aumentar la lipogénesis y disminuir la actividad de la cadena respiratoria mitocondrial (Pratoomyot et al., 2012).
- Síntesis de HUFA: Aumenta en enterocitos como esfuerzo compensatorio (Beli et al., 2003; Pratoomyot et al., 2012).
- Estrés Oxidativo: Se observa regulación al alza de genes de detoxificación y defensa antioxidante (Pratoomyot et al., 2012).

6. Respuesta al estrés y parámetros hematológicos:

En trucha arcoíris, ciertas sustituciones de AP por AV y/o grasas animales han mostrado efectos negativos en el perfil eritrocítico (disminución de recuento de eritrocitos (RBC), hemoglobina (Hb), hematocrito (Hct)) y han inducido algunas alteraciones leucocitarias y en bioquímicos séricos (Alami et al. 2024). En cuanto a la función inmune, parámetros plasmáticos como la lisozima y la IgM parecen ser relativamente robustos a ciertas variaciones lipídicas dietéticas tanto en trucha arcoíris como en juveniles de salmón del Atlántico bajo condiciones de piensos comerciales (Kim et al. 2024).

Impactos Hematológicos

Los parámetros sanguíneos son indicadores vitales de la salud. Estudios en trucha arcoíris (*O. mykiss*) han mostrado que la sustitución de aceite de Pescado por ciertas combinaciones de aceites vegetales y grasas animales puede afectar negativamente el perfil eritrocítico.

Disminución de parámetros eritrocíticos en *O. mykiss* con dietas alternativas (datos basados en Alami et al., 2024).

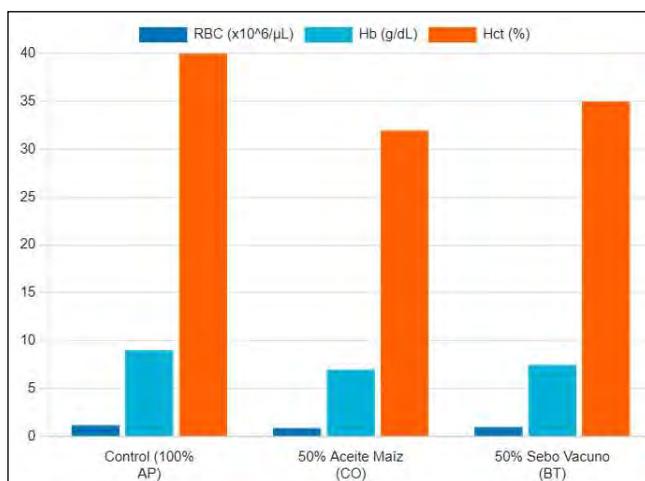


Figura 5: Cambios en parámetros eritrocíticos por reemplazo de AP por AV en trucha arcoiris (Alami et al., 2024).

7. Disbiosis de la flora intestinal:

Existe poca evidencia de posibles disbiosis provocadas por inclusión de AV en las dietas de los salmónidos. Algunas publicaciones mencionan que, los AV pueden alterar la diversidad y composición del microbiota intestinal del salmón, con efectos que varían según el tipo de AV, el nivel de inclusión y la etapa de vida del pez (Nikouli et al., 2021; Ringø et al., 2016; Gajardo et al., 2017).

Aceites vegetales novedosos, como el aceite de Camelina transgénica enriquecido con EPA y DHA, tienden a tener un impacto menos negativo sobre la histología intestinal y pueden mantener mejor el perfil de Ácidos Grasos Poliinsaturados de Cadena Larga n-3 en los tejidos del pez en comparación con los AV convencionales (Betancor et al. 2015). Incluso en ausencia de daño histológico severo, los AV inducen cambios significativos en la expresión génica intestinal, particularmente en vías relacionadas con el metabolismo lipídico, la respuesta inmune y, en algunos casos, la proliferación celular (Gajardo et al. 2017; Betancor et al. 2015).

PROGRAMA TECNOLÓGICO PTEC-INVA.

El Programa Tecnológico para la Producción Local de Insumos Nutricionales para la Acuicultura, conocido como PTEC-INVA, representa una iniciativa estratégica y transformadora en Chile. Su objetivo general es conformar e implementar una plataforma de apoyo que fomente la producción, uso y transformación de insumos vegetales nutricionales provenientes de cultivos de rotación de la macrozona sur y austral de Chile. Estos insumos buscan ser una fuente sostenible, escalable, y costo-efectiva de proteínas y aceites para la elaboración de dietas en la industria de salmónidos. Este programa es liderado por Salmones Antártica, y se estructura en dos etapas principales: el desarrollo y validación tecnológica, y la industrialización de la solución.

El programa PTEC-INVA es crucial para la industria salmonera chilena al abordar la necesidad urgente de reemplazar los aceites de pescado por alternativas vegetales para lograr mayor sostenibilidad, reducir la dependencia de insumos importados, y fomentar la agroindustria local. La evaluación y validación de estos nuevos insumos es un

pilar fundamental del programa, que se articula a través de distintos proyectos interconectados, desde la selección y el fortalecimiento de la producción primaria de materias primas vegetales locales como canola, camelina, soya, y linaza, incluyendo la validación de nuevas genéticas como la "Omega3 Canola" por su potencial para producir aceite rico en Omega-3 (INIA y AGROTOP). Otros proyectos están dedicados al procesamiento y obtención de aceites o *blends*, así como a concentrados proteicos, evaluando su factibilidad técnica y económica (CETA, TEAMS, AGROTOP). Complementando lo anterior la validación a escala piloto de los ingredientes en peces, midiendo el impacto en la calidad del pellet (dureza, densidad, flotabilidad, hidroestabilidad), la digestibilidad aparente, el desempeño productivo (crecimiento, FCR, SGR), y la composición nutricional del filete (perfiles de ácidos grasos, aminoácidos y minerales) en trucha arcoiris y salmón del Atlántico, tanto en agua dulce como salada lo está realizando la U. de Chile con la U. Católica de Temuco. Finalmente, el proyecto liderado por VeHiCe, se encarga de monitorear y diagnosticar la condición inmunológica y gastrointestinal de los salmónidos ante la inclusión de ingredientes vegetales, desarrollando paquetes tecnológicos de diagnóstico integral (Pack Liver, Pack Gut, Pack Bone, Pack Immune) y una plataforma web progresiva para la vigilancia de patologías nutricionales (https://vehice.com/ptec_inva/). Todo esto sienta las bases para una validación industrial y comercialización de insumos nutricionales de base vegetal locales que sean costo-efectivos, de alta calidad y contribuyan a una acuicultura más responsable.

EL ROL DE VEHICE DENTRO DEL PROGRAMA PTEC-INVA

VeHiCe (Veterinary Histopathology Center) es un coejecutor clave del Programa Tecnológico PTEC-INVA, su especialización en asesorías y diagnóstico de salud de peces permiten llevar a cabo su misión que es monitorear y diagnosticar la condición inmunológica y gastrointestinal de los salmónidos en respuesta a ingredientes vegetales en la dieta. Este trabajo es fundamental para asegurar la inocuidad y funcionalidad de las nuevas dietas, minimizando posibles inconvenientes productivos de tipo sanitario.

EXPERIENCIA DE VEHICE EVALUANDO REEMPLAZOS DE AP POR AV EN DIETAS DE SALMÓNIDOS.

A lo largo de su trayectoria, Vehice ha acompañado a diversas empresas e investigadores en sus procesos investigativos y exploratorios, abordando una amplia gama de problemáticas sanitarias. Entre los casos más destacados se encuentran estudios específicos sobre las alteraciones en distintos indicadores de salud provocadas por la incorporación de aceites de diversos orígenes en la dieta de salmónidos.

El cambio desde un perfil lipídico rico en ácidos grasos omega-3 de cadena larga (EPA y DHA) hacia uno dominado por ácidos grasos omega-6 (como el ácido linoleico) y omega-3 de cadena corta (ALA) genera efectos directos y evidentes sobre la estructura celular y tisular de los salmones. Los órganos más afectados por este cambio son el intestino y el hígado, dada su participación clave en la digestión, absorción y metabolismo de los lípidos.

A nivel hepático, el diagnóstico primario y central asociado al estrés metabólico inducido por una dieta con un perfil lipídico inadecuado es la elevada vacuolización lipídica. Esta condición corresponde a una acumulación excesiva de grasa en los hepatocitos, resultado de la limitada capacidad de los salmones para procesar y exportar grandes cantidades de ácidos grasos omega-6. Como consecuencia, se produce una depleción de glucógeno, observándose hepatocitos predominantemente ocupados por vacuolas lipídicas en lugar de las áreas claras e irregulares características del glucógeno.

A nivel intestinal, uno de los principales desafíos asociados al reemplazo de aceites en la dieta es la inflamación del intestino distal. En condiciones normales, un intestino sano de salmón presenta vellosidades largas, delgadas y bien organizadas, con una lámina propia constituida por tejido conectivo laxo y una baja densidad de células inmunitarias. Sin embargo, en peces alimentados con dietas con altas inclusiones de aceites vegetales, se observan alteraciones significativas, tales como: acortamiento y fusión de vellosidades (lo que reduce

la superficie disponible para la absorción de nutrientes), engrosamiento de la lámina propia y del tejido submucoso, infiltración leucocitaria (con una marcada presencia de linfocitos y granulocitos en la lámina propia y submucosa), y/o pérdida de la vacuola supranuclear (afectando la integridad de la barrera intestinal y su capacidad de absorción de antígenos).

Si bien el intestino y el hígado son los protagonistas, a la hora de evaluar alteraciones, otros tejidos también pueden mostrar cambios. El tejido graso que se encuentra difuso alrededor de las vísceras y ciegos pilóricos también puede mostrar un aumento en la infiltración inflamatoria (esteatosis). En el músculo, La composición de ácidos grasos del filete cambia drásticamente, lo cual no es una alteración histológica per se, pero es una consecuencia directa con implicancias para la calidad del producto final y la salud del consumidor. En algunos estudios, se ha reportado una mayor deposición de grasa

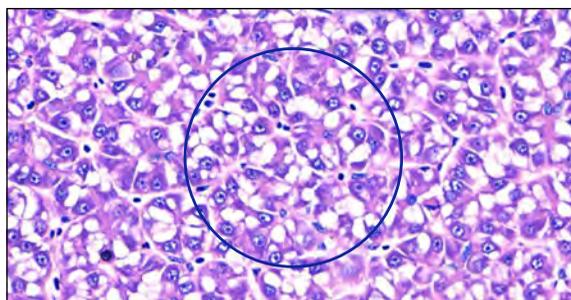


Figura 6: Hígado. H&E. Se observa degeneración vacuolar lipídica de hepatocitos.

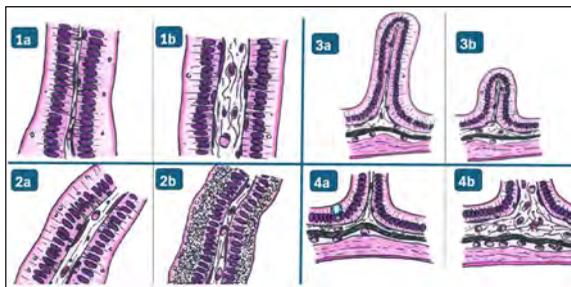


Figura 7: Esquema de normalidades (a) y anomalías (b) en estructuras intestinales. 1a, Hay un núcleo muy fino y delicado de tejido conectivo (lámina propia) en todos los pliegues de la mucosa. 1b, Hay una lámina propia muy gruesa en muchos pliegues. 2a, Escasa vacuolización de los enterocitos. 2b, Hay un claro incremento de la vacuolización que afecta a todos los enterocitos. 3a, Los pliegues mucosos son largos y delgados. 3b, los pliegues mucosos son cortos y engrosados. 4a, Hay una capa muy fina de tejido conectivo entre la base del pliegue y el estrato compacto. 4b, Hay una capa gruesa de tejido conectivo debajo de muchos pliegues.

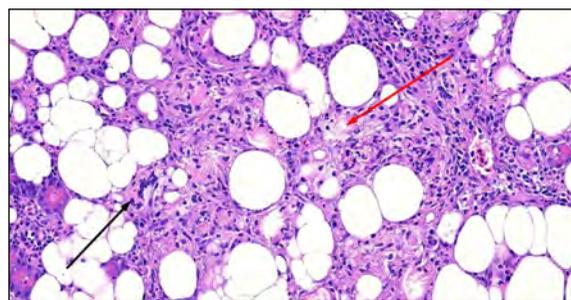


Figura 8: Ciegos Pilóricos/Páncreas. H&E. Se observa degeneración de tejido adiposo (flecha roja) e infiltrado inflamatorio en tejido adiposo (flecha negra).

intramuscular, aunque esto puede variar según la formulación de la dieta. El músculo cardíaco es muy dependiente de los ácidos grasos omega-3 para su correcto funcionamiento. Dietas deficientes en EPA y DHA pueden llevar a cambios ultraestructurales en las mitocondrias de las células cardíacas y a una mayor deposición de lípidos, aunque esto a menudo requiere de microscopía electrónica para una evaluación detallada.

En complemento a los análisis histológicos Vehice ha desarrollado paquetes tecnológicos para diagnosticar correctamente las alteraciones más frecuentes a la hora de probar nuevos compuestos nutricionales, las que están siendo expuestas dentro del marco del desarrollo del Programa Tecnológico PTEC INVA, en la página WEB https://vehice.com/ptec_inva/

CONCLUSIÓN

La sustitución del aceite de pescado (AP) por aceites vegetales (AV) en las dietas para salmónidos es una transición ineludible, impulsada por la necesidad de sostenibilidad económica y ambiental. Sin embargo, esta publicación demuestra de manera contundente que dicho reemplazo constituye un complejo acto de equilibrio, donde el aparente éxito en mantener el rendimiento productivo puede enmascarar importantes costos biológicos y nutricionales.

El hallazgo más consistente es la marcada dilución de los ácidos grasos omega-3 de cadena larga, EPA y DHA, en los tejidos del pez, especialmente en el filete y el hígado. Esta alteración no solo es

proporcional al nivel de sustitución, sino que también reduce el valor nutricional del salmón para el consumidor final.

A nivel patológico, los efectos son claros y órgano-específicos. El cambio en el perfil lipídico induce alteraciones subclínicas críticas, manifestándose principalmente como:

- Esteatosis hepática, caracterizada por una elevada vacuolización lipídica en los hepatocitos y una notoria depleción del glucógeno, señal de un profundo estrés metabólico.

- Enteritis, con un acortamiento y fusión de los pliegues intestinales, infiltración leucocitaria en la lámina propia y submucosa, y pérdida de la vacuola supranuclear, comprometiendo la capacidad de absorción y la integridad de la barrera intestinal.
- Alteraciones pancreáticas, como la infiltración de grasa y la inflamación del tejido adiposo peripancreático.

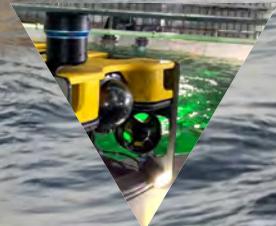
Estos hallazgos subrayan que no todos los aceites vegetales son iguales. Aquellos ricos en omega-6 (ácido linoleico), tienden a ser más pro-inflamatorios, mientras que fuentes ricas en el precursor omega-3 ALA (ácido alfa-linolénico), pueden tener efectos distintos.

El futuro de una salmonicultura sostenible y saludable no reside en un reemplazo indiscriminado, sino en un enfoque estratégico y multifactorial. La investigación y la industria deben avanzar hacia la optimización de mezclas de AV, la incorporación de fuentes novedosas como microalgas y aceites de plantas genéticamente modificadas (ej. Camelina, Canola) ricas en EPA y DHA, y la selección de líneas genéticas de peces con mayor capacidad de biosíntesis endógena. Iniciativas locales como el programa PTEC-INVA son cruciales para validar insumos nacionales y desarrollar herramientas de diagnóstico que permitan monitorear la salud de los peces en tiempo real.

BIBLIOGRAFÍA

- Bell, J. G., Pratoomyot, J., Strachan, F., Henderson, R. J., Fontanillas, R., Hebard, A., Guy, D. R., Hunter, D., & Tocher, D. R. (2010). Growth, flesh adiposity and fatty acid composition of Atlantic salmon (*Salmo salar*) families with contrasting flesh adiposity: Effects of replacement of dietary fish oil with vegetable oils. *Aquaculture*, 306(1-4), 225-232.
- Betancor, M. B., Sprague, M., Caballero, M. J., Tocher, D. R., & Oliva-Teles, A. (2015). Evaluation of a high-EPA oil from transgenic Camelina sativa in feeds for Atlantic salmon (*Salmo salar* L.): Effects on tissue fatty acid composition, histology and gene expression. *Aquaculture*, 437, 230-239.
- Caballero-Solares, A., Rojas, V., Oyarzún-Salazar, R., Valenzuela-Muñoz, V., Gallardo-Gálvez, J., & Mercado, L. (2024). Dietary linseed oil potentiates the antiviral interferon pathway in Atlantic salmon (*Salmo salar*) head kidney leukocytes. *Fish & Shellfish Immunology*, 144, 109265.
- Holen, E., Vikesá, V., Ruyter, B., & Kousoulaki, K. (2018). Dietary fatty acids affects the gene expression of pattern-recognition receptors, and lipid and eicosanoid metabolism in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *British Journal of Nutrition*, 120(1), 23-37.
- Jin, Y., Olsen, Y., Oviedo, R. E., Sissener, N. H., Ruyter, B., Mørkøre, T., & Jin, Y. (2020). Comparative Transcriptomics Reveals Adaptive Responses to Vegetable Oil Diets in Domesticated Atlantic Salmon (*Salmo salar*) Liver and Pyloric Caeca. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 7, 602587.
- Leaver, M. J., Villeneuve, L. A. N., Obach, A., Jensen, L., Bron, J. E., Taggart, J. B., & Tocher, D. R. (2008). Functional genomics reveals increases in cholesterol biosynthetic genes and highly unsaturated fatty acid biosynthesis after dietary substitution of fish oil with vegetable oils in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *BMC Genomics*, 9(1), 299.
- Lund, I., Dalsgaard, J., Jacobsen, C., Hansen, J. H., Holm, J., & Jokumsen, A. (2013). Effects of organic plant oils and role of oxidation on nutrient utilization in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Animal*, 7(3), 394-403.
- Martínez-Rubio, L., Evjemo, J. O., Bæverfjord, G., Wadsworth, S., & Østbye, T. K. (2013). Feed restriction and fish oil sparing in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) fingerlings: effects on lipid metabolism in the liver. *British Journal of Nutrition*, 110(7), 1210-1221
- Mellery, J., Brel, J., Dort, J., Geay, F., Kestemont, P., Francis, D. S., Larondelle, Y., & Rollin, X. (2017). A n-3 PUFA depletion applied to rainbow trout fry (*Oncorhynchus mykiss*) does not modulate its subsequent lipid bioconversion capacity. *British Journal of Nutrition*, 117(2), 187-199.
- Moldal, T., Oehme, M., Aas, A., Holen, E., Mørkøre, T., Øverland, M., & Koppang, E. O. (2014). Substitution of dietary fish oil with plant oils is associated with shortened mid intestinal folds in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *BMC Veterinary Research*, 10(1), 60.
- Morais, S., Silva, T., Cordeiro, O., Rodrigues, P., Guy, D. R., Bron, J. E., Taggart, J. B., Bell, J. G., & Tocher, D. R. (2012). Effects of genotype and dietary fish oil replacement with vegetable oil on the intestinal transcriptome and proteome of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *BMC Genomics*, 13, 448
- Qian, M., Liu, J., Jiang, M., Cao, J., Li, Y., Zhao, S., Yuan, S., Wang, R., Zheng, W., Zhang, K. (2024). Impact of Plant or Animal Lipid Substitutes for Fish Oil in Aquafeeds on Fish Growth and Fatty Acid Composition: A Meta-Analysis. *Animals*, 14(14), 2118.
- Ringø, E., Zhou, Z., Vecino, J. L. G., Wadsworth, S., Romero, J., Krogdahl, A., ... & Merrifield, D. L. (2016). Effect of dietary components on the gut microbiota of aquatic animals. A never-ending story? *Aquaculture Nutrition*, 22(2), 219-282.
- Torstensen, B. E., Espe, M., Stubhaug, I., et al. (2011). Dietary plant proteins and vegetable oil blends increase adiposity and plasma lipids in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *British Journal of Nutrition*, 106, 633-647.
- Usak, M., & Tufan, B. (2018). [Effects of using different vegetable oils instead of fish oil in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792) feeds on growth performance and body fatty acid composition]. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 35(4), 387-393.
- Zhu, Y., Ma, Z., Li, Y., Wang, A., & Liu, B. (2020). Effects of replacing fish oil with a blend of vegetable oils on growth performance, fatty acid composition, and lipid metabolism of juvenile golden trout (*Oncorhynchus mykiss* aguabonita). *Aquaculture Research*, 51(11), 4529-4539.

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

EVOLUCIÓN EN EL USO DE TRATAMIENTOS ANTIPARASITARIOS PARA EL CONTROL DE CALIGUS EN CHILE



Sandra Bravo¹, Melinka Mancilla²

¹ Universidad Austral de Chile

² Programa de Doctorado en Acuicultura, Universidad de Chile, Universidad católica del Norte y Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

El piojo de mar ha estado presente desde los inicios de la salmicultura en Chile y para su control se han utilizado productos antiparasitarios que fueron inicialmente desarrollados para el control de parásitos en animales terrestres, y a partir del 2021 se han incorporado al mercado antiparasitarios en base a productos naturales para el control de *Caligus* en Chile (Tabla 1).



Los primeros registros del piojo de mar datan de 1981 año en que se registró a *Caligus teres* parasitando al salmón coho (*Oncorhynchus kisutch*), los cuales fueron tratados con Neguvon aplicado

por baño (Reyes & Bravo, 1983). El Neguvon es un organofosforado sensible a la luz y al calor, por lo que los tratamientos eran aplicados al atardecer. Los primeros tratamientos fueron realizados extrayendo los peces desde la jaula a un estanque con la solución del medicamento, pero debido a la alta complejidad de la operación y al estrés generado en los peces, se adaptó una lona de camión para tratar a los peces directamente en la jaula, lo que generó el desarrollo de la lona

cerrada, método actualmente utilizado para los tratamientos por baño.

Tabla 1: Productos autorizados para el control de *Caligus* en Chile

Producto	Administración	Ingrediente	Periodo de resguardo (°D)	Dosis (ingrediente activo)	Periodo de uso	Resistencia reportada
Neguvon® (Triclorfon)	baño	Organofosforado clorado	-	0,25 ppm/ 1 h	1981 - 1985	
Nuvan® (Diclorvos)	baño	Organofosforado clorado	-	1 ppm/1 h	1985 - 2001	
Ivermectina	oral	Avermectina	-	0,07 mg/kg pez/week/3 weeks	1989 - 2003	
Benzoato de emamectina *	oral	Avermectina	0	50 µg/kg pez/ día/ 7 días	1999 a la fecha	Bravo y col., 2008
Peróxido de hidrógeno*	baño		0	1.500 ppm/20 min	2007 a la fecha	
Deltametrina *	baño	Piretroide	10	0,2 ppb/30 min	2007 a la fecha	Helgesen y col., 2014
Diflubenzuron	oral	Benzoilurea	300	6 mg/kg pez/día/14 días	2009 a la fecha	
Cipermetrina*	baño	Piretroide	30	15 ppb/30 min	2010 a la fecha	
Azametifos*	baño	Organofosforado clorado	10	100 ppb/30 min	2013 a la fecha	Marín y col., 2015
Lufenuron*	oral	Benzoilurea	1.350	5mg /kg pez/día/7 días	2016 a la fecha	
Hexaflumuron*	baño	Benzoilurea	1.923	2ppm/2 h	2019 a la fecha	
Lyptus-plus*	baño		0	0,1 ppm/ 30 min 5 ppm/ 60 min	2021 a la fecha	
Rosseus-plus*	baño		0	7,5 ppm /45 min	2023 a la fecha	

(*) Productos actualmente usados para el control de *Caligus* en Chile

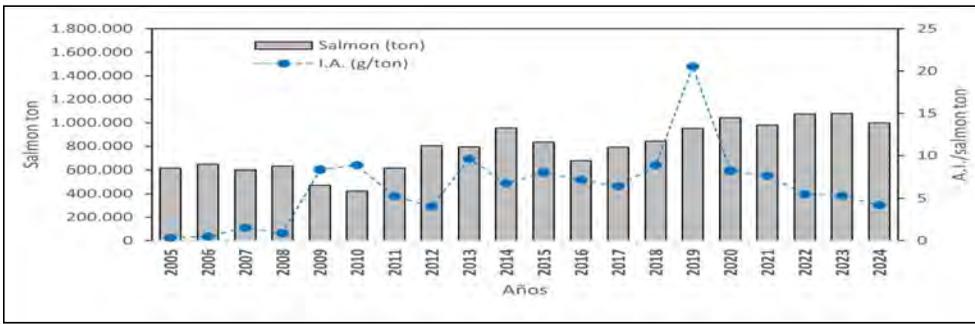


Figura 1: Gramos de ingrediente activo de productos farmacológicos por tonelada de salmón cosechado en Chile. No incluye peróxido de hidrógeno. Fuente: elaboración propia con datos de Sernapesca.

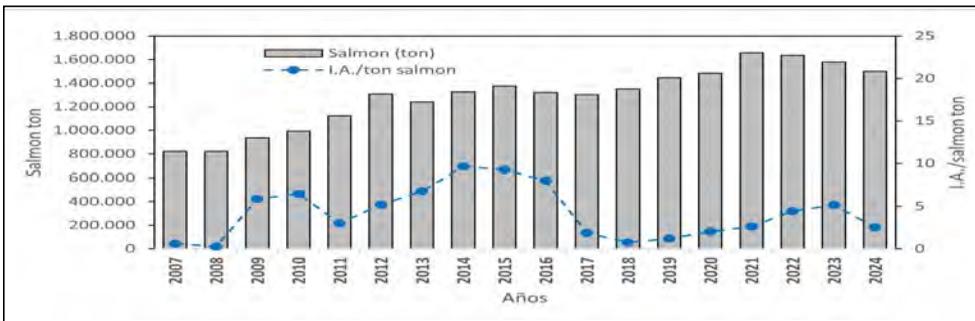


Figura 2: Gramos de ingrediente activo de antiparasitario por tonelada de salmón cosechado en Noruega. No incluye peróxido de hidrógeno. Fuente: elaboración propia con datos de Parsons y col (2025) y del Instituto Noruego de Salud Pública.

antiparasitario, lo que llevó a buscar otras alternativas de tratamiento.

En 2007 fue autorizada la deltametrina y en 2010 la cipermetrina para el control de *Caligus*, ambos piretroides aplicados por baño, haciendo uso de un faldón para contener el producto. A partir de 2008 se observó evidencias de desarrollo de resistencia en *C. rogercresseyi* a los piretroides (Helgesen y col. 2014), y a partir de 2013 se autoriza el azametifos. En mayo de 2013 SERNAPESCA prohíbe el uso de faldón, exigiendo el uso de lona cerrada, y a partir de 2014 se reporta reducción de la sensibilidad en *C. rogercresseyi* al azametifos (Marín y col., 2015; Agusti y col., 2016), lo que explica el alto volumen de azametifos registrado en 2019 (Tabla 2; Fig. 1). El rápido desarrollo de resistencia de *C.*

rogercresseyi al azametifos podría explicarse por el uso de organofosforados para el control del piojo de mar en el período 1981-2000, lo que concuerda con la menor sensibilidad y multiresistencia reportada para *L. salmonis* a los organofosforados y piretroides, productos que fueron reintroducidos para el control del piojo de mar en el Atlántico Norte (Fjørtoft y col., 2021).

A partir de 1985, el Neguvon fue reemplazado por Nuvan aplicado por baño, compuesto organofosforado estable en presencia de luz. El Nuvan se dejó de usar en 2001, siendo reemplazado por la ivermectina que se usó entre 1989 y 2003. La ivermectina suministrada en el alimento entregaba una protección sobre 2,5 meses y actuaba sobre todos los estados de desarrollo de *Caligus* en el pez (Bravo, 2003), pero por su alta toxicidad no fue autorizada para el tratamiento de peces, usándose fuera de etiqueta en Irlanda, Canadá y Chile (Horsberg, 2012).

En 1997 emerge *Caligus rogercresseyi* (Boxshall & Bravo, 2000) infestando severamente al salmón del Atlántico (*Salmo salar*) y trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), y a partir del 2000 se autoriza el uso de benzoato de emamectina, convirtiéndose en el principal compuesto utilizado para el control del piojo de mar en Chile por su fácil aplicación a través del alimento y alta eficacia, hasta que en 2006 se comenzó a observar pérdida de efectividad y evidencias de desarrollo de resistencia en *C. rogercresseyi* (Bravo y col., 2008), lo cual fue posteriormente reportado para *Lepeophtheirus salmonis* en Escocia (Lee y col., 2008), Canadá (Jones y col., 2013) y Noruega (Helgesen & Horsberg, 2013). Por otro lado, Bravo y col. (2010a) en estudios realizados bajo condiciones de laboratorio, reportaron que la pérdida de sensibilidad al benzoato de emamectina persistía en *C. rogercresseyi* por al menos siete generaciones sucesivas originadas de una población resistente, sin haber sido expuestas al producto

El peróxido de hidrógeno (H₂O₂) se introdujo a Chile como tratamiento alternativo para el control del piojo de mar en 2007 y en los últimos años se ha utilizado de forma intensiva, pero solo a partir de 2018 se tiene información oficial acerca de los volúmenes de producto utilizado (Tabla 2). A la fecha no hay evidencia de desarrollo de resistencia en *C. rogercresseyi* al peróxido de hidrógeno, aun cuando se ha reportado resistencia en *L. salmonis* en Escocia (Treasurer y col., 2000) y también en Noruega (Helgesen y col., 2015). Sin embargo, es importante señalar que el peróxido de hidrógeno no mata al piojo de mar. Bravo y col. (2010b) reportaron que a los 10 minutos después de finalizado el tratamiento con 1.500 ppm de peróxido de hidrógeno, aplicado por baño de 20 minutos bajo condiciones controladas, los piojos se recuperaron rápidamente y fueron capaces de infestar nuevos peces. Lo que es corroborado por Marín et al. (2017), quienes reportaron que los piojos expuestos durante 20 minutos a 825 ppm de peróxido de hidrógeno (45% menos que la dosis recomendada) generó el desprendimiento del 100% de los ejemplares adultos, pero que una vez finalizado el tratamiento,

los machos se activaron a los 30 minutos y las hembras a 1 hora post tratamiento. La misma situación fue registrada en *L. salmonis* (Hodneland y col., 1993). A partir de 2022, la normativa sanitaria en Chile obliga a que los wellboats incorporen un sistema de filtro con tamaño de malla $\leq 300 \mu\text{m}$ para coleccionar los piojos, antes de que el agua residual pueda ser descargada al mar y así minimizar la reinfestación.

En 2008 se autorizó el uso de diflubenzurón, benzoilurea aplicado en el alimento que inhibe la síntesis de quitina, por lo que tiene efecto solo sobre los estadios de desarrollo que realizan muda (chalimus) y no sobre los ejemplares adultos. En 2016 fue autorizado el lufenurón aplicado en el alimento previo al traspaso de los smolts a las jaulas marinas y en 2019 se autorizó el hexaflumurón aplicado por baño en jaula.

EFECTO DE LOS PESTICIDAS SOBRE EL MEDIOAMBIENTE ACUÁTICO

Los impactos que puedan generar los tratamientos con pesticidas para el control del piojo de mar en los organismos acuáticos son de alta preocupación a nivel global, principalmente cuando son aplicados por baño y los medicamentos se descargan en el entorno circundante después de finalizado el tratamiento. Este tema también ha sido abordado por investigadores en Chile.

Urbina y col. (2019) reportaron que los antiparasitarios azametifos, peróxido de hidrógeno, deltametrina y cipermetrina, liberados in situ después de un tratamiento por baño, tienen efectos negativos sobre las especies no objetivo, tanto las que viven permanentemente en la columna de agua como las que solo habitan en la columna de agua durante la fase larvaria. Bravo y col. (2015), informaron de un efecto perjudicial sobre la maduración y eclosión de los sacos ovígeros, así como sobre la supervivencia de las larvas de *C. rogercresseyi*, cuando hembras ovígeras fueron expuestas, bajo condiciones de laboratorio, a diferentes concentraciones de azametifos, deltametrina, benzoato de emamectina y peróxido de hidrógeno, lo que podría ocasionar efectos similares en otros organismos marinos expuestos a estos productos antiparasitarios.

Tucca y col. (2014) informaron que la cipermetrina y la deltametrina

en dosis altas causan 100% de mortalidad en el anfípodo marino *Monocorophium insidiosum*; Gebauer y col. (2017) reportaron que la cipermetrina, deltametrina, azametifos y peróxido de hidrógeno afectan negativamente a las larvas del crustáceo *Metacarcinus edwardsii*; Rain-Franco y col. (2018) informaron que el uso de azametifos, deltametrina y benzoato de emamectina puede tener efectos potenciales sobre la microbiota no objetivo y sobre la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos; Montory y col. (2023) reportaron que la interacción entre la temperatura y azametifos tiene efectos perjudiciales sobre el rendimiento fisiológico y la supervivencia de *Ostrea chilensis*, y que estos efectos también deben evaluarse para otras especies no objetivo. Por otro lado, Valdés-Castro & Fernández (2021) concluyeron que el uso de plaguicidas en la salmicultura produce diversas respuestas a nivel microbiano, estimulando y/o inhibiendo las comunidades microbianas con el consiguiente impacto en los balances de nitrógeno.

Por el contrario, Willis y col. (2005) reportaron que el efecto de la dilución de los medicamentos cuando se liberan en la masa de agua que rodea un centro de cultivos es rápida y que la concentración decae rápidamente con el tiempo. Sin embargo, es importante tener presente que el potencial impacto de estos tratamientos en el ambiente acuático es dependiente de las condiciones oceanográficas, la concentración de centros de cultivo, y la frecuencia de tratamientos en el área afectada.

Tabla 2: Volumen de productos farmacológicos (ingrediente activo) utilizados para el control de Caligus en Chile

I.A. (kg)	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
EMB	212	326	906	285	65	47	49	219	164	529
DTM	0	0	5,2	105,2	31,7	34,3	39,9	197	152	36
CYP	-	-	-	-	-	29,7	341,6	677	585	170
AZA	-	-	-	-	-	-	-	-	3.207	5.183
DIF	-	-	-	162	3.878	3.639	2.815	2.167	3.504	587
LUF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HEXA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	212	326	911,2	552,2	3.974,7	3.750	3.245,5	3.260	7.612	6.505
Salmon (ton)	614.139	647.263	600.835	630.647	473.579	423.121	613.219	804.000	793.400	955.179
g. IA/ton salmon	0,34	0,50	1,52	0,88	8,39	8,86	5,29	4,05	9,59	6,81
H2O2 (ton)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

I.A. (kg)	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
EMB	120,9	84,6	52,8	44,8	129,2	33,7	29,2	42,78	114,58	526,9
DTM	41,4	32,3	32,1	42,8	145,8	36,7	11,7	3,91	6,21	10,65
CYP	121,9	40,2	8,2	0	2,4	11,3	6,7	0	0	0
AZA	6.032,2	4.208,8	4.748,2	6.808,7	15.915,3	6.656,9	3.548,2	1.194,6	2.106,32	2.661,42
DIF	356,8	425,0	0	324,0	147,7	0	0	0	0	0
LUF	31,7	92,3	188,9	267,2	2.455,0	400,8	520,2	586,3	632,38	383,55
HEXA	-	-	62,5	0	763,1	1.484,1	3.429,9	4.094,1	4.094,06	706,37
Total	6.704,9	4.883,2	5.092,7	7.487,5	19.558,5	8.623,5	7.545,9	5.921,7	6.953,6	4.288,9
Salmon (ton)	834.168	676.474	791.103	843.000	953.300	1.043.144	978.274	1.074.172	1.077.935	998.200
g. IA/ton salmon	8,04	7,22	6,44	8,88	20,52	8,27	7,71	5,51	6,45	4,30
H2O2 (ton)	-	-	-	195,1	3.215,5	4.119,19	5.618,32	4.320,68	10.449,07	11.886,34

Fuente: Elaboración propia con datos de Sernapesca. EMB= benzoato de emamectina; DTM=deltametrina; CYP=cipermetrina; AZA= azametifos; DIF=diflubenzurón; LUF= lufenurón; HEXA= hexaflumurón. I.A.= ingrediente activo.

Método	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Agua dulce	1	0	2	12	33	42	22	36	135
Lyptus plus	0	0	0	0	61	180	74	213	294
Agua dulce + Lyptus plus	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Rosseus plus	0	0	0	0	0	0	0	16	60
Tratamiento térmico	4	0	0	0	9	0	0	0	0
Agua a presión	0	0	0	8	2	0	0	0	0
Total	5	0	2	20	105	222	96	265	491

Fuente: Elaboración propia con datos de Sernapesca

Tabla 3: Número de tratamientos no farmacológicos aplicados anualmente para el control de Caligus en Chile

TRATAMIENTOS NO FARMACOLÓGICOS

La pérdida de sensibilidad del piojo de mar a la mayoría de los medicamentos utilizados para su control y el potencial impacto de estos productos en el ambiente acuático, han llevado a buscar estrategias no-farmacológicas para reducir la infestación por piojos de mar a nivel global. En Chile, SERNAPESCA ha priorizado el uso de tratamientos no farmacológicos por sobre los químicos, con el fin de reducir el volumen de productos antiparasitarios utilizados para el control de Caligus. La actual normativa no permite más de tres tratamientos consecutivos con un producto de la misma estructura molecular para minimizar el riesgo de desarrollo de resistencia. Sin embargo, a pesar de la pérdida de efectividad, los medicamentos antiparasitarios siguen siendo la principal herramienta para el control del piojo de mar en Chile (Tabla 1), sin registrarse hasta ahora una disminución en los volúmenes de productos antiparasitarios usados por la industria salmonera nacional (Figura 1), a diferencia de Noruega que a partir de 2016 privilegió el uso de tratamientos no farmacológicos por sobre los tratamientos farmacológicos (Jensen y col., 2020), registrándose una importante reducción en el volumen de antiparasitarios a partir de 2017 (Figura 2). Sin embargo, a partir de 2021 se ha registrado un incremento en el volumen de antiparasitarios con la incorporación del pesticida imidacloprid (Ectosan-vet) aplicado por baño.

En Chile, el uso de tratamientos no farmacológicos ha aumentado lentamente a partir de 2016 (Tabla 3). Los tratamientos con baño de agua dulce y los tratamientos con el producto Lyptus-plus aplicado por baño, fueron los principales tratamientos alternativos utilizados para el control del piojo de mar en el período 2020-2024, en tanto que los tratamientos mecánicos no han sido adoptados por parte de la industria Chilena, a diferencia de Noruega y Escocia, probablemente por el negativo impacto en el bienestar de los peces y el riesgo de incrementar brotes de enfermedades causadas por otros patógenos (Walde y col., 2021; Bravo & Treasurer, 2023).

CONCLUSIONES

El piojo de mar sigue siendo la principal amenaza para la industria del salmón a nivel global. Ha desarrollado resistencia frente a todos los antiparasitarios disponibles, y la mayoría de los tratamientos no-farmacológicos desarrollados hasta ahora tienen un efecto negativo sobre el bienestar de los peces, causándoles sufrimiento, daño mecánico, problemas fisiológicos e inmunosupresión.

Tanto los tratamientos mecánicos como la mayoría de los tratamientos por baño eliminan a los parásitos presentes en el pez al momento de su aplicación, pero no previenen que los peces sean nuevamente parasitados después de haber finalizado el tratamiento. El riesgo de reinfestación es mayor cuando los tratamientos aplicados no matan al parásito, lo que genera un incremento en la resistencia y/o adaptación del parásito que sobrevive a los tratamientos. Frente a este escenario, la investigación en los últimos años ha estado centrada en el desarrollo de métodos preventivos que impidan que los piojos tomen contacto con los peces.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agusti C., Bravo S., Contreras G., et al. 2016. Sensitivity assessment of *Caligus rogercresseyi* to anti-lice chemicals in relation to treatment efficacy in Chilean salmonid farms. *Aquaculture*. 458:195-205.
- Bravo S., Treasurer J. 2023. The Management of the Sea Lice in Chile: A Review. *Reviews in Aquaculture* 15:1749-1764.
- Bravo S., Silva MT, Agusti C., Samba K., Horsberg TE. 2015. The effect of chemotherapeutic drugs used to control sea lice on the hatching viability of egg strings from *Caligus rogercresseyi*. *Aquaculture*. 443: 77-83.
- Bravo S., Sevatdal S., Horsberg T. 2010a. Sensitivity assessment in the progeny of *Caligus rogercresseyi* to emamectin benzoate. *Bull Eur Ass Fish Pathol*. 30: 92-98.
- Bravo S., Treasurer J., Sepulveda M., Lagos C. 2010b. Effectiveness of hydrogen peroxide in the control of *Caligus rogercresseyi* in Chile and implications for sea louse management. *Aquaculture*.303:22-27.
- Bravo S., Sevatdal S., Horsberg TE. 2008. Sensitivity assessment of *Caligus rogercresseyi* to emamectin benzoate in Chile. *Aquaculture*. 282: 7-12.
- Bravo S. 2003. Sea lice in Chilean salmon farms. *Bulletin of the European Association of Fish Pathologists*. 23(4):197-200.
- Boxshall GA., Bravo S. 2000. On the identity of the common Caligus (Copepoda, Siphonostomatoida, Caligidae) from salmonid netpen system in southern Chile. *Contributions to Zoology*. 69, 137-146.

- Fjørtoft HB, Nilsen F, Besnier F, et al. Losing the “arms race”: multiresistant salmon lice are dispersed throughout the North Atlantic Ocean. *R Soc. Open Sc.* 2021; 8:210265
- Gebauer P, Paschke K, Vera C, Toro JE, Pardo M, Urbina M. 2017. Lethal and sub-lethal effects of commonly used anti-sea lice formulations on non-target crab *Metacarcinus edwardsii* larvae. *Chemosphere.* 185: 1019–1029.
- Helgesen KO, Romstad H, Aaen S, Horsberg TE. 2015. First report of reduced sensitivity towards hydrogen peroxide found in the salmon louse *Lepeophtheirus salmonis* in Norway. *Aquaculture Reports.* 1:37-42
- Helgesen KO, Bravo S, Sevatdal S, Mendoza J, Horsberg TE. 2014. Deltamethrin resistance in the sea louse *Caligus rogercresseyi* (Boxhall and Bravo) in Chile: bioassay results and usage data for antiparasitic agents with references to Norwegian conditions. *J Fish Dis.* 37:877–90.
- Helgesen KO, Horsberg TE. 2013. Single-dose field bioassay for sensitivity testing in sea lice, *Lepeophtheirus salmonis*: development of a rapid diagnostic tool. *J. Fish Dis.* 36: 261–272.
- Hodneland K., Nylund A., Nilsen F., Midttun B. 1993. The effect of Nuvan, azamethiphos and hydrogen peroxide on salmon lice (*Lepeophtheirus salmonis*). *Bull Eur Ass Fish Pathol.* 13: 203–206.
- Horsberg TE. 2012. Avermectin Use in Aquaculture. *Current Pharmaceutical Biotechnology.* 13: 1095-1102.
- Jensen M., Horsberg TE., Sevatdal S., Helgesen KO. 2020. Trends in de-lousing of Norwegian farmed salmon from 2000-2019- Consumption of medicines, salmon louse resistance and non-medicinal control methods. *PLoS ONE.* 15(10): e0240894.
- Jones PG., Hammell KL., Gettinby G., Revie CW. 2013. Detection of emamectin benzoate tolerance emergence in different life stages of sea lice, *Lepeophtheirus salmonis*, on farmed Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *J Fish Dis.* 36: 209–220
- Lees F., Baillie M., Gettinby G., Revie CW. 2008. Efficacy of emamectin benzoate against infestations of *Lepeophtheirus salmonis* on farmed Atlantic salmon (*Salmo salar* L) in Scotland, 2002–2006. *PLOS ONE.* 3, e1549.
- Marín SL., González MP., Madariaga ST., Mancilla M., Mancilla J., Woywood D. 2017. Response of *Caligus rogercresseyi* (Boxshall & Bravo, 2000) to Hydrogen Peroxide: Recovery of parasites, fish infestation and egg viability under experimental conditions. *J Fish Dis.* doi:10.1111/jfd.12691
- Marín SL, Ibarra R., Medina MH., Jansen PA. 2015. Sensitivity of *Caligus rogercresseyi* (Boxshall and Bravo 2000) to pyrethroids and azamethiphos measured using bioassay tests. A large-scale spatial study. *Prev Vet Med.* 122:33–41.
- Montory JA., Cubillos VM., Lee MR., et al. 2023. The interactive effect of anti-sea lice pesticide azamethiphos and temperature on the physiological performance of the filter-feeding bivalve *Ostrea chilensis*: A non-target species. *Marine Environmental Research.* 183: 105837
- Parsons A., Escobar-Lux R., Hannisdal R., Agnalt A., Samuelsen O. 2025. Anti-sea lice veterinary medicinal products on salmon farms: a review and analysis of their usage patterns, environmental fate and hazard potential. *Reviews in Aquaculture.* 17:e13006
- Rain-Franco A., Rojas C., Fernandez C. 2018. Potential effect of pesticides currently used in salmon farming on photo and chemoautotrophic carbon uptake in central-southern Chile. *Aquaculture.* 486: 271–284.
- Reyes X., Bravo S. 1983. Notas sobre una copepoidosis en salmones de cultivo. *Inv Mar.* 11:55-57.
- Treasurer JW., Wadsworth S., Grant A. 2000. Resistance of sea lice, *Lepeophtheirus salmonis* (Krøyer), to hydrogen peroxide on farmed Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *Aquac Res.* 31: 855–860.
- Tucca F., Diaz-Jaramillo M., Cruz G., Silva J., Bay-Schmith E., Chiang G., Barra R. 2014. Toxic effects of antiparasitic pesticides used by the salmon industry in the marine amphipod *Monocorophium insidiosum*. *Arch Environ Contam Toxicol.*; 67:139–148.
- Urbina MA., Cumillaf JP., Paschke K., Gebauer P. 2019. Effects of pharmaceuticals used to treat salmon lice on non-target species: evidence from a systematic review. *Sci Total Environ.* 649: 1124–1136.
- Valdés-Castro V., Fernández C. 2021. Effect of Three Pesticides Used in Salmon Farming on Ammonium Uptake in Central-Southern and Northern Patagonia, Chile. *Front Mar Sci.* 7:602002. doi: 10.3389/fmars.2020.602002.
- Walde CS., Jensen BB., Pettersen JM., Stormoen M. 2021. Estimating cage level mortality distributions following different delousing treatments of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in Norway. *J Fish Dis.*; 44:899–912.
- Willis KJ., Gillibrand PA., Cromey CJ., Black KD. 2005. Sea lice treatments on salmon farms have no adverse effects on zooplankton communities: a case study. *Marine Pollution Bulletin.*; 50: 806-816

PHARMAQ

We make aquaculture progress

PHARMAQ, líder mundial en vacunas e innovación para la acuicultura, forma parte de Zoetis, líder mundial en salud animal.

La empresa desarrolla productos seguros, eficaces y respetuosos con el medio ambiente, basados en investigaciones específicas y el compromiso de un equipo altamente dedicado.

Las instalaciones de producción, administración, investigación y desarrollo se encuentran en Noruega, con filiales en Chile y otros países del mundo.

PHARMAQ, cuenta con aproximadamente 420 empleados. Los productos de la compañía se comercializan en Europa, Norteamérica, Sudamérica y Asia.

PHARMAQ
part of **zoetis**

PHARMAQ
Fishteq

PHARMAQ
Analytiq



**Vacunas y
terapéuticos**

PHARMAQ, parte de Zoetis



**Equipos de
vacunación**

PHARMAQ Fishteq



**Diagnóstico
y asesoría**

PHARMAQ Analytiq



pharmaq.com



zoetis

SMOLTVISION, CASO DE ESTUDIO; SINERGIA POSITIVA CON APLICACIÓN DE VACUNA ALPHA JECT LIVAC® SRS.



Jorge Infante G. ¹, Elise Hjelle ², Cristian Uribe G. ³, Carlos Lobos ⁴

¹ Gerente de Servicios Diagnósticos, PHARMAQ Analytiq SpA Chile. Asociado MEVEA

² Gerente de Proyectos y Smolt, PHARMAQ Analytiq Noruega

³ Gerente Técnico Senior, PHARMAQ As Chile. Asociado MEVEA

⁴ Director de Unidad de Negocios, PHARMAQ Analytiq SpA Chile. Asociado MEVEA

RESUMEN

SmoltVision es el primer test comercialmente disponible capaz de diferenciar entre isoformas de ATPasa de agua salada y agua dulce mediante RT-PCR en tiempo real. La experiencia documentada a continuación, corresponde la comparación entre SmoltVision y otra herramienta de verificación del proceso de esmoltificación y el uso sinérgico con la vacuna Alpha Ject LiVac® SRS con el fin de conocer el performance sanitario de distintas poblaciones, posterior a la transferencia.

INTRODUCCIÓN

La actividad de la Na⁺/K⁺-ATPasa (NKA total) se ha utilizado durante mucho tiempo como un indicador de la preparación para el agua de mar en los salmónidos juveniles. Durante algún tiempo se ha sabido que la esmoltificación inadecuada afecta negativamente la supervivencia en mar, el crecimiento y la susceptibilidad a enfermedades (McCormick 2013). La investigación ha relacionado la progresión normal a través del proceso de esmoltificación con el aumento en la actividad de la NKA total (Zaugg & McClain, 1970; McCormick y col., 2009a). Como resultado, la medición de la NKA total ha sido mundial y ampliamente aceptada como el método "Gold Standard" de evaluación de esmoltificación dentro de la industria comercial del salmón (McCormick 2013). A pesar de este enfoque que busca determinar la tolerancia al agua de mar, la industria salmonicultora sigue experimentando una considerable mortalidad post-transferencia al agua de mar y pérdidas en la productividad, algunas de las cuales se han relacionado con un tiempo subóptimo de transferencia al mar (Bleie y Skrudland, 2014; Informe Sanitario Sernapesca 2023). En forma paulatina, tanto en la industria salmonicultora de Noruega y también la de Chile, se ha observado una tendencia a aumentar el tamaño de los peces al momento de la transferencia al agua de mar.

Se han identificado y caracterizado distintas isoformas de la subunidad a (alfa) catalítica de la enzima NKA dentro de las células de cloro de salmónidos (Richards y col., 2003, McCormick y col., 2009b). Se ha demostrado que la expresión de estas isoformas cambia de manera predecible durante todo el proceso de esmoltificación (McCormick y col., 2013). Además, se han asociado diferentes funciones osmorregulatorias con estas diferentes isoformas. La isoforma a-1a NKA (FW NKA) se ha asociado con la expresión en agua dulce y está involucrada en la absorción de soluto. Por el contrario, la isoforma a-1b NKA (SW NKA) es expresada predominantemente en el ambiente de agua de mar y está involucrada con la secreción de soluto a través de las branquias (McCormick y col., 2009b). El aumento de la expresión de SW NKA en los salmones, está relacionada con el aumento de la tolerancia al agua de mar (Nilsen y col., 2008, Steffanson y col., 2009). El monitoreo convencional de la ATPasa indica la cantidad de ATPasa total, que es la suma de todas las isoformas activas en las branquias al momento de la evaluación. Este ensayo fue desarrollado por Uni Research AS (Bergen, Noruega) en la Universidad de Bergen y en el 2015, PHARMAQ Analytiq adquirió los derechos del análisis y lo nombró "SmoltVision". SmoltVision, un análisis basado en la técnica de RT-PCR en tiempo real ofrecido por PHARMAQ Analytiq, es la única prueba comercial disponible que puede diferenciar entre la expresión de las distintas isoformas.

SmoltVision mide los niveles relativos de ARNm de tres marcadores distintos asociados con la esmoltificación; FW NKA, SW NKA y un cofactor. Con base en los datos recopilados PHARMAQ Analytiq desarrolló un algoritmo el cual se utiliza para comparar e interpretar datos de nuevos muestreos. Una combinación variada que incluye, por ejemplo, rasgos visuales, comportamiento, temperatura, régimen de luz y niveles relativos de ARNm, revelan en qué fase de esmoltificación se encuentran actualmente los salmones. Los ensayos comerciales en terreno han demostrado la capacidad del ensayo SmoltVision para diferenciar entre la expresión de la isoforma de agua salada y la de agua dulce,

confirmando ser una herramienta beneficiosa para comprender y predecir la tolerancia al agua salada. PHARMAQ Analytiq, ha realizado este método en cientos de miles de peces, tanto en Noruega como en Chile y en los distintos mercados donde tiene presencia global (Reino Unido, Canadá, Tazmania, Islas Faroe).

MÉTODO

Se realizó un seguimiento de la evolución del proceso de esmoltificación de dos poblaciones de peces de Salmón del Atlántico (*S. salar*) con origen de tres centros de agua dulce, previo al traslado a un centro de engorda (ubicado en el Barrio 2) y seguimiento posterior de los parámetros de mortalidad acumulada, asociada a daño mecánico, a *P. salmonis*, y a peces desadaptados, desde el ingreso y hasta la semana 50 de cultivo.

La primera de ellas (621.672 individuos sembrados) tuvo como origen de dos centros de agua dulce, uno de flujo abierto (Piscicultura "A"; 3 jaulas sembradas) y otro de recirculación con ingreso de agua con salinidad de 4 ppt (Piscicultura "B"; 10 jaulas sembradas). Esta fracción de la población fue vacunada con Alpha Ject LiVac® SRS previo a la transferencia.

La segunda fracción de la población (Piscicultura "C"; 456.000 individuos sembrados en nueve jaulas) tuvieron como origen un centro de cultivo de flujo abierto. Esta no fue vacunada con vacuna viva previo al traslado.

Respecto de esto un estanque de la Piscicultura "A" fue evaluada con muestreos seriados de SmoltVision, por otra parte un estanque de la piscicultura "C" fue evaluado también mediante muestreos seriados de SmoltVision y un estanque con muestreos seriados de Pasa y un punto final comparativo con SmoltVision.

ENSAYO

Se realizaron muestreos seriados de SmoltVision al estanque 208 de la Piscicultura "A" durante el periodo de esmoltificación (fotoperiodo de verano). Se realizaron cuatro puntos muestrales con una diferencia de cinco, cuatro y dieciséis días a partir de la primera observación. Estos evidenciaron un desarrollo normal del proceso, con un aumento de la expresión de la ATPasa de agua de mar en el tercer punto muestral, la que fue revertida y evidenciada en el último punto. Se considero entonces que los peces se encontraban aptos para la transferencia en este punto: En los gráficos a continuación se describe el comportamiento de la población indicada. El área azul corresponde al porcentaje de expresión de FW NKA (Marcador de agua dulce o *Freshwater component*), el área amarilla la expresión de SW NKA (Marcador de agua de mar o *Seawater component*) y el área roja corresponde al Co-factor, asociado a adaptabilidad al agua de mar e integridad del tejido branquial, siendo un indicador de bienestar animal (Gráficos 1 y 2):

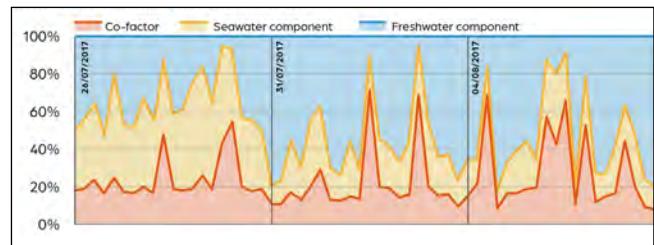


Gráfico 1: Puntos muestrales SmoltVision 1-3. Estanque 208

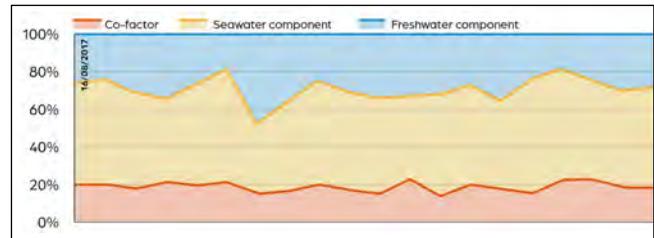


Gráfico 2: Punto muestral SmoltVision 4. Estanque 208

Por otra parte, las unidades de la Piscicultura "C" no evidenciaron el mismo comportamiento; el estanque 305, muestreado en las mismas fechas, arrojó resultados que indicaron que el proceso de esmoltificación no tuvo una evolución normal.

Para el caso del estanque 305 se observó una predominancia de la isoforma de agua dulce hasta el último punto muestral, como se detalla a continuación (Gráficos 3 y 4):

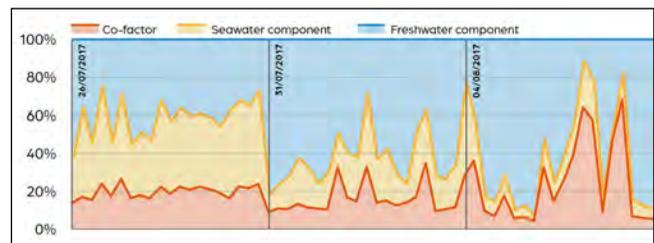


Gráfico 3: Puntos muestrales SmoltVision 1-3. Estanque 305

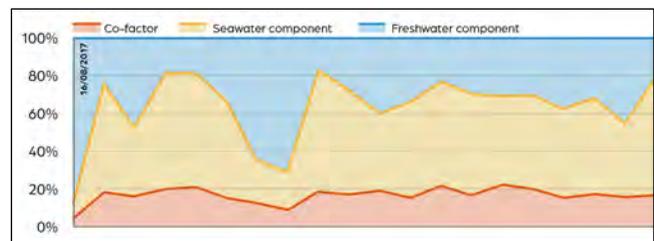


Gráfico 4: Punto muestral SmoltVision 4. Estanque 305

De igual manera, el estanque 308, muestreada previo al traslado (en la semana número 7), indicó un predominio del marcador de agua dulce (FW NKA o *Freshwater component*) como se detalla en el gráfico 5. Cabe señalar que esta unidad realizó muestreos seriados de ATPasa branquial durante todo el periodo de esmoltificación (a excepción de la semana 1, Wk 1 y la semana 3, Wk 3), no detectando esta medición alteraciones durante el proceso (fotoperiodo de verano) como detalla el gráfico 6.

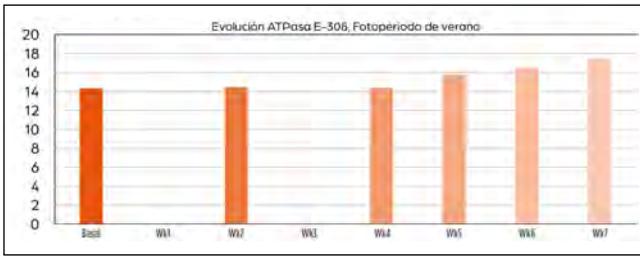


Gráfico 5: Punto muestral SmoltVision Semana número 7. Estanque 308

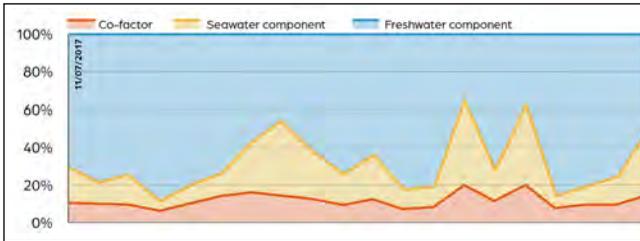


Gráfico 6: Puntos muestrales ATPasa branquial Estanque 308

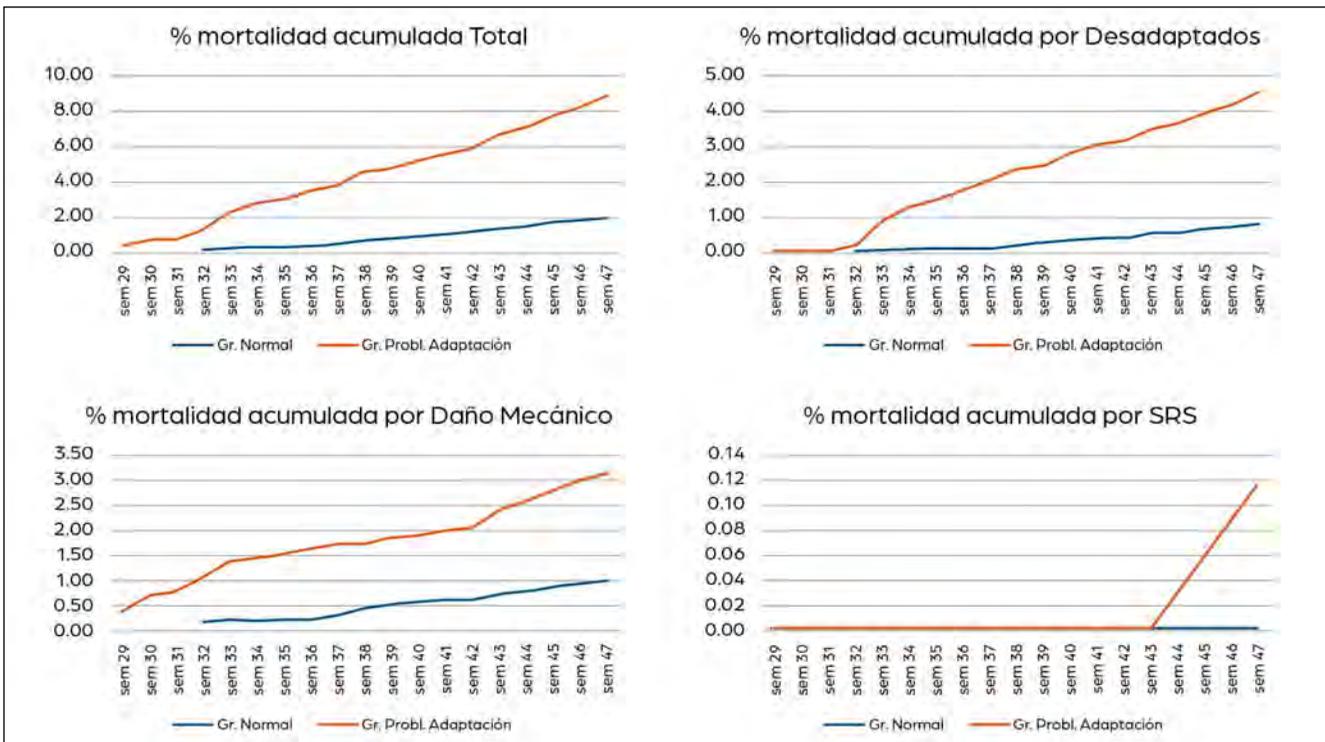
Para el caso de los estanques 305 y 308 de la Piscicultura “C”, se recomendó un muestreo posterior para observar la evolución de esta fracción de la población (456.000 peces), ya que no se consideró apta para la transferencia. No obstante, la empresa decidió por razones productivas, trasladar los peces al centro de engorda.

Finalmente se obtuvo información del performance sanitario de ambas poblaciones evaluadas, la que no presentó alteraciones durante el proceso y vacunadas con Alpha Ject LiVac® SRS (origen Piscicultura “A”) y la que si evidenció alteraciones y que no fueron vacunadas con la vacuna viva antes mencionada (origen Piscicultura “C”). A continuación, se describen las mortalidades acumuladas por cada grupo (población normal y población con problemas de adaptación) en lo referido a porcentajes totales, por desadaptados, daño mecánico y SRS.

A continuación, se detallan los gráficos de mortalidad de cada ítem evaluado (Gráfico 7):

Tabla 1: Mortalidades semana 50.

	Mortalidad acumulada total (semana 50)	Mortalidad acumulada por desadaptados (semana 50)	Mortalidad acumulada por daño mecánico (semana 50)	Mortalidad acumulada por SRS (semana 50)
Población “Normal”	2,30%	0,80%	1,10%	0,006%
Población “Probl. Adaptación”	10,30%	4,90%	3,40%	0,10%



Gráficos 7: Mortalidad total, acumulada, por daño mecánico y SRS (semana 50)



De la Tabla 1 y el Gráfico 7 podemos desprender que la mortalidad total y las clasificadas, por parte del personal del centro de cultivo, como “desadaptados”, “daño mecánico” y “SRS” son mayores, hasta la semana 50, en la población denominada “Problemas de adaptación” respecto a la denominada “Población normal”.

CONCLUSIÓN

Dentro de los factores claves para determinar un buen desempeño productivo dentro de la fase de engorda de especies salmonídeas está sin duda un monitoreo adecuado del proceso de esmoltificación durante la etapa de agua dulce y el uso de herramientas que nos permitan un adecuado control de agentes patógenos que afectan a los peces durante este periodo productivo. Si tomamos las medidas adecuadas, como el momento específico en que los peces deben ser transferidos, a través de un seguimiento estricto con las tecnologías disponibles para este fin, como la medición de marcadores moleculares como SmoltVision, nos permitirá disminuir el riesgo de sufrir mortalidades producto de peces desadaptados. El uso sinérgico

con vacunas para el control de agentes patógenos, en este caso, la protección contra la infección por *P. salmonis* a través de Alpha Ject LiVac® SRS también se ve potenciado cuando se logra un adecuado monitoreo de algunos procesos, como es en este caso el de una adecuada esmoltificación.

BIBLIOGRAFÍA

- McCormick 2013
- Zaugg & McClain, 1970; McCormick y col., 2009a
- Bleie y Skrudland, 2014
- Informe Sanitario Sernapesca 2023
- Nilsen y col., 2008
- Steffanson y col., 2009



SmoltVision

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE PCR MÚLTIPLE PARA TIPIFICAR EL ANTÍGENO "O" DE AISLADOS DE *Tenacibaculum dicentrarchi*



Pierre López^{1,2}, Henry Araya-León^{1,2} y Rubén Avendaño-Herrera^{1,2,3*}

¹ Laboratorio de Patología de Organismos Acuáticos y Biotecnología Acuicola, Facultad de Ciencias de la Vida, Universidad Andrés Bello, Viña del Mar, Chile

² Centro FONDAPE, Interdisciplinary Center for Aquaculture Research (INCAR), Universidad Andrés Bello, Viña del Mar, Chile

³ Centro de Investigación Marina Quintay (CIMARQ), Universidad Andrés Bello, Valparaíso, Chile

Numerosos estudios han buscado generar información científica útil sobre diferentes aislados de *T. dicentrarchi*, incluyendo su identificación, algunos mecanismos de virulencia que usa para causar la tenacibaculosis y el análisis de su genoma (Saldarriaga-Córdoba et al. 2021; Avendaño-Herrera et al. 2023; Echeverría-Bugueño y Avendaño-Herrera 2024). Aunque estos trabajos han ayudado bastante a entender lo complejo que es este patógeno, todavía se sabe poco sobre su diversidad genética relacionada con el grupo de genes del antígeno "O". Ello considerando que comprender apropiadamente las propiedades de este antígeno es muy importante, no solo para estudiar cómo se propaga en la población de *T. dicentrarchi* (por ejemplo, saber qué tipos o variantes son más comunes), sino también para poder desarrollar vacunas adecuadas y efectivas (Romalde et al. 2005).

El antígeno "O" forma la parte más externa de la capa de lipopolisacáridos en bacterias Gram negativas, y los componentes moleculares que determinan el serotipo están codificados en el genoma de la bacteria. Por tanto, el antígeno "O" muestra una gran variedad en su estructura entre diferentes cepas de bacterias,

lo que lo convierte en un elemento clave para distinguir entre distintos serotipos (Figura 1). Esto se ha observado en otras bacterias patógenas que afectan a los peces, como *Vibrio anguillarum* (Sørensen y Larsen 1986), *Flavobacterium psychrophilum* (Mata et al. 2002) y *Tenacibaculum maritimum* (Avendaño-Herrera et al. 2004). Esta última bacteria es una especie estrechamente relacionada con *T. dicentrarchi*. Tradicionalmente se han empleado estrategias y protocolos que se sustentan en la reacción antígeno-anticuerpo para identificar la existencia de diversidad serológica. Sin embargo, estudios recientes han mostrado que los métodos tradicionales (como la microaglutinación, aglutinación en portaobjetos, inmunodifusión, inmunofluorescencia indirecta, ELISA y dot blot) presentan varios problemas, lo que puede generar resultados poco confiables (Rochat et al. 2017; Lopez et al. 2022). Por ejemplo, algunas cepas tienden a aglutinarse solas, no reaccionan bien, o reaccionan con varios sueros diferentes, lo que obliga a realizar pruebas adicionales más complejas para obtener resultados claros. Para superar estas limitaciones, las técnicas moleculares ofrecen una alternativa más accesible y confiable, ya que se enfocan en

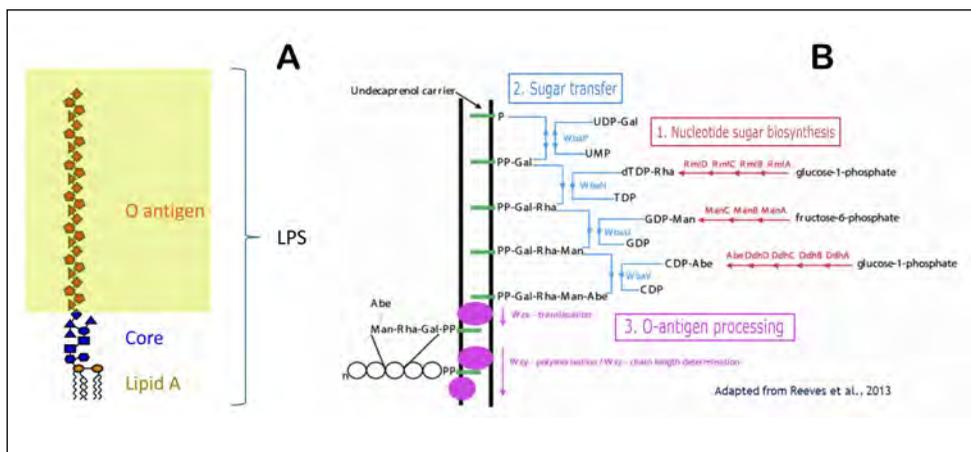


Figura 1: A) Diagrama del esquema del lipopolisacárido (LPS) y B) Esquema de rutas metabólicas y genes implicados en la biosíntesis y procesamiento del antígeno "O" tomado de Samuel & Reeves (2003; <https://doi.org/10.1016/j.carres.2003.07.009>).

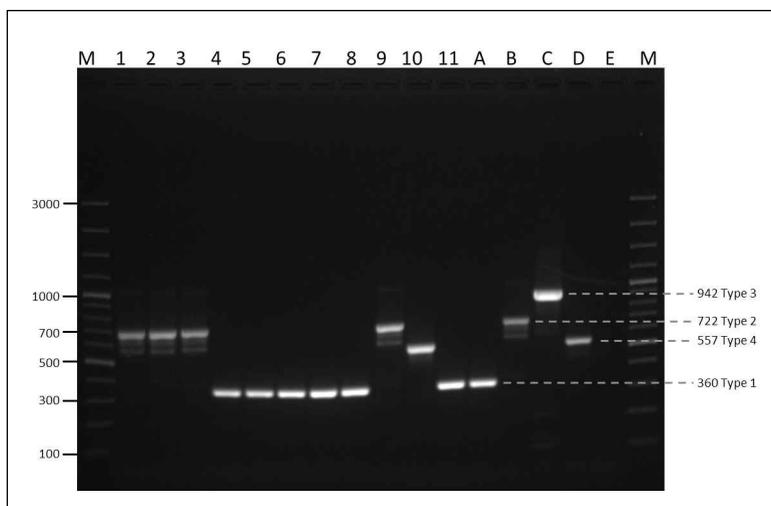


Figura 2: Productos de amplificación del ensayo de PCR múltiple desarrollado para tipificar el antígeno "O" de aislados de *Tenacibaculum dicentrarchi*.

la diversidad de los genes que producen los polisacáridos de superficie, como el antígeno "O". Esto abre la posibilidad de identificar y clasificar bacterias de manera más precisa, rápida y económica. Este tipo de enfoque ya ha sido utilizado con éxito en bacterias patógenas que afectan a humanos (Li et al. 2020), animales terrestres (Ma et al. 2016) y peces, como *F. psychrophilum* (Rochat et al. 2017) y *T. maritimum* (Lopez et al. 2022). Esta técnica molecular se basa en los genes responsables de producir el antígeno "O", los cuales generalmente se encuentran agrupados en un solo bloque del genoma, llamado O-AGC.

En *T. dicentrarchi*, el O-AGC fue identificado parcialmente por Saldarriaga-Córdoba et al. (2021), pero aún no se había estudiado su diversidad. En este estudio, realizamos un análisis genómico comparativo del O-AGC en 30 cepas con el genoma completamente secuenciado de *T. dicentrarchi*. Con esa información, desarrollamos un método de genotipificación basado en PCR múltiple. Esta técnica se aplicó exitosamente en 25 aislamientos bacterianos de *T. dicentrarchi* de Chile, y demostró ser una herramienta molecular eficiente, económica y reproducible para diferenciar combinaciones específicas de genes. Para mayor profundidad pueden revisar nuestro artículo recientemente publicado en *Journal of Fish Diseases* 2025; 0:e14122 - <https://doi.org/10.1111/jfd.14122>.

Para validar la PCR de genotipificación múltiple de *T. dicentrarchi* basada en el grupo de genes del antígeno "O", se utilizaron 25 aislamientos chilenos de *T. dicentrarchi*, los cuales se confirmaron como pertenecientes a esta especie bacteriana mediante la secuenciación de los genes 16S rRNA y *fusA*. Todas las secuencias de nucleótidos obtenidas fueron depositadas en la base de datos

GenBank, con los números de acceso PQ046955-PQ046971 y PQ106407-PQ106408. Con base en estos resultados, todos los aislamientos chilenos de *T. dicentrarchi* fueron incluidos en los análisis posteriores.

Nuestro primer paso fue usar el genoma de la cepa tipo 35/09T (número de acceso GCA_964036635.1) para identificar el grupo de genes involucrados en la biosíntesis del antígeno "O" y diseñar herramientas que permitan detectar diversidad antigénica. En *T. dicentrarchi* 35/09T, el grupo de genes del antígeno "O" (O-AGC) está formado por 20 genes distribuidos en aproximadamente 23 mil pares de bases (22.739 pb), con un contenido de G + C del 27,70 %, un poco menor al 31,3 % reportado originalmente por Piñeiro-Vidal et al. (2012). Todos los genes de este grupo están transcritos en la misma dirección, y algunos probablemente forman unidades policistrónicas (es decir, varios genes que se transcriben juntos como un solo bloque).

Entre los 29 genomas disponibles públicamente, se encontró que en 18 de ellos el grupo de genes del antígeno "O" (O-AGC) estaba fragmentado (es decir, distribuido en varios contigs o fragmentos de secuencia). Curiosamente, en todos estos aislamientos las rupturas de los *contigs* ocurrían en la misma región: un segmento duplicado de 2.567 pares de bases que también está presente en la cepa tipo 35/09T. Es importante destacar que todos estos aislamientos compartían más del 98 % de identidad en los primeros 10 genes del O-AGC de la cepa *T. dicentrarchi* 35/09T. Nuestro análisis respalda fuertemente la idea de que, en estos aislamientos, el O-AGC también se encuentra en una sola región del genoma.

El grupo de genes del antígeno "O" (O-AGC) en los 29 aislamientos de *T. dicentrarchi* incluidos en este estudio estuvo compuesto por entre 17 y 21 genes, con longitudes que variaron entre 19.171 y 23.630 pares de bases. Para analizar la diversidad del O-AGC, comenzamos con un análisis filogenético de todas las secuencias que abarcaban completamente esta región; es decir, se consideraron los 11 genomas con O-AGC no fragmentado. Este análisis permitió clasificar los 11 aislamientos en cuatro grupos distintos, denominados como Tipos 1 a 4. Esta nomenclatura sigue el mismo criterio utilizado en estudios realizados sobre *F. psychrophilum* (Rochat et al. 2017) y *T. maritimum* (Lopez et al. 2022). Dentro de cada Tipo se observaron pequeñas variaciones, como la presencia ocasional de genes relacionados con el metabolismo de azúcares nucleótidos.

Para el diseño de los partidores o primers (Tabla 1), empleamos los genes de procesamiento del antígeno "O" (*wzx/wzy* y *wzm/wzt*), ya que son mucho más determinantes para el serotipo e ideales para desarrollar métodos de serotipificación mediante PCR múltiple (Cao et al. 2018; Liu et al. 2013), que los genes de glucosiltransferasas y los genes involucrados en la síntesis de precursores de azúcares nucleotídicos (Ballmer et al. 2007; Samuel y Reeves 2003). Esta PCR múltiple se aplicó con éxito a una colección de 15 aislados chilenos de *T. dicentrarchi* con genomas conocidos. Dado nuestro conocimiento previo sobre el Tipo al que pertenecía cada uno de los 15 *T. dicentrarchi*, produciendo la PCR resultados positivos con los productos de amplificación esperados.

En una segunda etapa, de los 25 aislamientos chilenos analizados, la mayoría (9 aislamientos) poseían un O-AGC Tipo 1. Estos aislamientos provenían principalmente de salmón del Atlántico, pero curiosamente, 2 fueron aislados de morenas rojas. Los tipos 2 y 4 fueron los menos representados, con solo 4 aislamientos cada uno (16 %), y 2 de los aislamientos Tipo 2 también fueron aislados de morenas rojas. El Tipo 3 (32 %) estuvo compuesto completamente por aislamientos de salmón del Atlántico. Estos resultados contrastan un poco con los hallazgos de los análisis genómicos de *T. dicentrarchi* recuperados de Noruega y Canadá, donde todos los genomas de este patógeno pertenecían al Tipo 1. Se necesitan más estudios con un mayor número de aislamientos de diversas regiones geográficas para determinar si la diversidad del locus de biosíntesis del antígeno "O" es característica de los aislamientos chilenos.

Nuestros resultados revelan la alta diversidad genética de los O-AGC en *T. dicentrarchi*. Esta diversidad dentro de nuestra colección de muestras se captura eficazmente con el enfoque de PCR múltiple desarrollado, que proponemos aquí como una herramienta valiosa para la tipificación rápida y confiable dentro de *T. dicentrarchi*. Los estudios epidemiológicos se verán facilitados a través de esta herramienta, al igual que la selección de aislamientos adecuados para el desarrollo de vacunas contra la tenacibaculosis en granjas de peces.

AGRADECIMIENTOS

FONDECYT 1230068 - FONDAP INCAR 1523A0007.

Tabla 1: Set de primers específicos para la PCR multiplex utilizados para *Tenacibaculum dicentrarchi*.

Primers	Secuencia (5' → 3')	Tamaño producto de amplificación (pares de base)	Tipo
Wzy1_T_dicentrarchi FWD 1	GGCAAATAGTTACAGCACAA	360	1
Wzy1_T_dicentrarchi REV 1	CGAGAAAACCAACGACTAAA		
wzy2_T_dicentrarchi FWD 1	TTCAGGTTTTCGTTACGATG	722	2
wzy2_T_dicentrarchi REV 1	G TTCACCAA ACTGGAAGAAA		
wzy3_FW1	TTCAGTAACCATCGGAGTAG	942	3
wzy3_REV2	AGTTTCACCTTTAAGTTGCA		
wzy4_FW1	GTTGCAGAATTAGTGATGCT	557	4
wzy4_REV2	GATTACCATTATCTGCTGTATATC		

REFERENCIAS

- Avendaño-Herrera R, B Magariños, S López-Romalde, JL Romalde, and AE Toranzo (2004). Phenotypic Characterization and Description of Two Major O-Serotypes in *Tenacibaculum maritimum* Strains From Marine Fishes. *Diseases of Aquatic Organisms* 58, 1:1–8. <https://doi.org/10.3354/dao058001>.
- Avendaño-Herrera R, M Saldarriaga-Córdoba, M Echeverría-Bugueño, and R Irgang (2023). In Vitro Phenotypic Evidence for the Utilization of Iron From Different Sources and Siderophores Production in the Fish Pathogen *Tenacibaculum dicentrarchi*. *Journal of Fish Diseases* 46, 9:1001–1012. <https://doi.org/10.1111/jfd.13820>.
- Ballmer K, BM Korczak, P Kuhnert, P Slickers, R Ehricht, and H Hächler (2007). Fast DNA Serotyping of *Escherichia coli* by Use of an Oligonucleotide Microarray. *Journal of Clinical Microbiology* 45, 2:370–379. <https://doi.org/10.1128/JCM.01361-06>.
- Cao H, M Wang, Q Wang, et al. (2018). Identifying Genetic Diversity of O Antigens in *Aeromonas hydrophila* for Molecular Serotype Detection. *PLoS One* 13, 9:e0203445. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203445>.
- Echeverría-Bugueño M, and R Avendaño-Herrera (2024). *Tenacibaculum dicentrarchi* Produce Outer Membrane Vesicles (OMV) That Are Associated With the Cytotoxic Effect in Rainbow Trout Head Kidney Macrophages. *Journal of Fish Diseases* 47, 2:e13888. <https://doi.org/10.1111/jfd.13888>.
- Li Y, J Huang, X Wang, C Xu, T Han, and X Guo (2020). Genetic Characterization of the O-Antigen and Development of a Molecular Serotyping Scheme for *Enterobacter cloacae*. *Frontiers in Microbiology* 11:727. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00727>.
- Liu Z, H Zheng, M Gottschalk, et al. (2013). Development of Multiplex PCR Assays for the Identification of the 33 Serotypes of *Streptococcus suis*. *PLoS One* 8, 8: e72070. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0072070>.
- Lopez P, S Bridel, D Saulnier, et al. (2022). Genomic Characterization of *Tenacibaculum maritimum* O-Antigen Gene Cluster and Development of a Multiplex PCR-Based Serotyping Scheme. *Transboundary and Emerging Diseases* 69, 5:e2876–e2888. <https://doi.org/10.1111/tbed.14637>.
- Ma L, L Wang, Y Chu, et al. (2016). Characterization of Chinese *Haemophilus parasuis* Isolates by Traditional Serotyping and Molecular Serotyping Methods. *PLoS One* 11, 12:e0168903. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168903>.
- Mata M, A Skarmeta, and Y Santos (2002). A Proposed Serotyping System for *Flavobacterium psychrophilum*. *Letters in Applied Microbiology* 35, 2: 166–170. <https://doi.org/10.1046/j.1472-765x.2002.01157.x>.
- Piñeiro-Vidal M, D Gijón, C Zarza, and Y Santos (2012). *Tenacibaculum dicentrarchi* sp. nov., a Marine Bacterium of the Family Flavobacteriaceae Isolated From European Sea Bass. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 62, 2:425–429. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.025122-0>.
- Rochat T, E Fujiwara-Nagata, S Calvez, et al. (2017). Genomic Characterization of *Flavobacterium psychrophilum* Serotypes and Development of a Multiplex PCR-Based Serotyping Scheme. *Frontiers in Microbiology* 8:1752. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01752>.
- Romalde JL, C Ravelo, S López-Romalde, R Avendaño-Herrera, B Magariños, and AE Toranzo (2005). Vaccination Strategies to Prevent Emerging Diseases for Spanish Aquaculture. In *Progress in Fish Vaccinology. Developments in Biologicals*, edited by P. J. Mydtyng, vol. 121, 85–95. Karger.
- Saldarriaga-Córdoba M, R Irgang, and R Avendaño-Herrera (2021). Comparison Between Genome Sequences of Chilean *Tenacibaculum dicentrarchi* Isolated From Red Conger Eel (*Genypterus chilensis*) and Atlantic Salmon (*Salmo salar*) Focusing on Bacterial Virulence Determinants. *Journal of Fish Diseases* 44, 11:1843–1860. <https://doi.org/10.1111/jfd.13503>.
- Samuel G, and P Reeves (2003). Biosynthesis of O-Antigens: Genes and Pathways Involved in Nucleotide Sugar Precursor Synthesis and O-Antigen Assembly. *Carbohydrate Research* 338, 23:2503–2519. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2003.07.009>.
- Sørensen UB, and JL Larsen (1986). Serotyping of *Vibrio anguillarum*. *Applied and Environmental Microbiology* 51, 3:593–597. <https://doi.org/10.1128/aem.51.3.593-597.1986>.



- **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
 MCARDENAS@PLASTICOSAUSTRAL.CL WWW.PLASTICOSAUSTRAL.CL

EL CARRAGENANO LAMBDA COMBATE EFICAZMENTE AL VIRUS DE LA NECROSIS PANCREÁTICA INFECCIOSA (IPNV) QUE INFECTA CÉLULAS DE SALMÓNIDOS

Daniela Espinoza ¹, Ana María Sandino ^{1,2}, Alejandra Moenne ¹, Mónica Imarai ^{1,2}

¹ Departamento de Biología, Facultad de Química y Biología, Universidad de Santiago de Chile, Alameda 3363, Santiago, Chile

² Centro de Biotecnología Acuícola (CBA)

El Virus de la Necrosis Pancreática Infecciosa (IPNV) produce una enfermedad mortal y altamente contagiosa llamada necrosis pancreática infecciosa en varias especies de peces, incluidos los peces salmónidos como trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) y salmón del Atlántico (*Salmo salar*). La transmisión del virus comienza con su ingreso al pez a través de las branquias y/o del epitelio intestinal. Después de unos días, el virus puede ser detectado en leucocitos sanguíneos, en el riñón, el bazo, páncreas, piel, ciegos pilóricos, intestino y otros órganos (Dopazo, 2020). Los peces más susceptibles son los alevines jóvenes, pero también pueden infectarse en etapas más avanzadas de desarrollo. Los signos de la enfermedad incluyen anorexia, oscurecimiento de la piel, exoftalmia, hígado amarillo y hemorragias petequiales en grasa visceral. Las lesiones histopatológicas incluyen necrosis de la mucosa intestinal, muerte de células acinares pancreáticas y daño del tejido hepático (Dopazo, 2020).

Dado que el virus históricamente ha causado grandes pérdidas en la acuicultura, se han desarrollado varias estrategias de control entre las que se incluyen la producción y uso de vacunas y la selección genética de poblaciones de peces resistentes, entre otras. Sin embargo, todos estos métodos han demostrado tener una eficacia limitada para mitigar los brotes causados por el virus (SERNAPESCA, 2024). La aparición de nuevos y más frecuentes brotes de IPN, ha llevado a considerar al IPNV como un patógeno re-emergente (Godoy et al., 2022). En consecuencia, existe una necesidad urgente de buscar desarrollar nuevas maneras de controlar las infecciones virales que sean sustentable y amigables con el medio ambiente para controlar las infecciones por el virus IPNV, dadas las considerables

implicaciones comerciales y ecológicas asociadas con las especies de peces de cultivo susceptibles.

En un marco general, disponer de vacunas y antivirales son dos maneras de controlar las infecciones virales, que son complementarias. La primera permite desarrollar inmunidad en los peces y por lo tanto, busca prevenir la infección o eliminar rápidamente al virus produciendo la recuperación del pez que ha desarrollado la enfermedad. La segunda opción, se utiliza para tratar a los individuos infectados o enfermos, eliminando o evitando la proliferación del microorganismos patógeno, por tanto, también produciendo la recuperación del individuo infectado. En este contexto, nuestro grupo ha investigado la potencial utilización de compuestos de origen natural como agentes antivirales en plantas y animales (Vera et al., 2011; Valenzuela et al., 2018). Nos hemos enfocado en identificar compuestos que puedan servir como inmunoestimulantes o adyuvantes en vacunas antivirales, tanto nuevas como existentes y además, estamos explorando su uso directo como antivirales que actúen previniendo la adhesión, invasión y proliferación viral. Específicamente, hemos analizado potenciales efectos anti-virales de los carragenanos, una familia de polisacáridos que se pueden extraer de las paredes celulares de algunas macroalgas rojas. Escogimos polisacáridos porque estos poseen actividad anti-viral

en plantas terrestres y presentan excelentes atributos respecto de su biodegradabilidad e inocuidad ambiental, lo que los convierte en una opción muy atractiva para el desarrollo de soluciones antivirales sustentable en la acuicultura. Estructuralmente, los carragenanos son galactanos sulfatados lineales formados por unidades alternas de D-

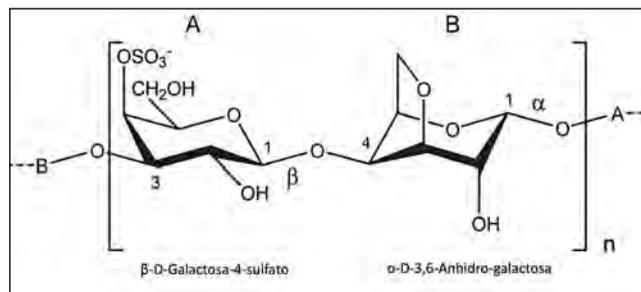


Figura 1: Estructura química de los carragenanos. Imagen adaptada de Tahiri et al., 2023.



Figura 2: Fotografía de alga roja marina *Gigartina skottsbergii*

galactosa y 3,6-anhidrogallactosa unidas por enlaces glucosídicos α -1,3 y β -1,4 (Figura 1). Estos se clasifican según su grado de sulfatación como carragenanos kappa, iota y lambda, que contienen uno, dos y tres grupos sulfato, respectivamente.

En un estudio reciente (Espinoza et al., 2024) se evaluó el efecto antiviral de los carragenanos kappa (κ), iota (ι) y lambda (λ) contra IPNV en células de salmón chinook. Los carragenanos (CGN) utilizados fueron aislados de la macroalga roja *Gigartina skottsbergii* (Figura 2) por Gelymar S.A. (Santiago, Chile) y se obtienen libres de metabolitos secundarios y proteínas. La actividad antiviral se analizó usando un modelo de infección de células de salmón Chinook CHSE-214 con IPNV, donde se determinó si el compuesto en estudio inhibe la formación de placas de lisis producidas por el virus en estas células. Los resultados expresados como concentración inhibitoria del 50% (IC_{50}) mostraron que λ -CGN exhibe la mayor actividad antiviral seguido de ι -CGN y de κ -CGN, mientras que κ -CGN mostró un menor efecto antiviral (Tabla 1). λ -CGN inhibe las placas de lisis producidas por IPNV, mostrando un IC_{50} de 0,9 $\mu\text{g}/\text{mL}$ que es similar al efecto demostrado con este mismo polisacárido en virus del dengue y virus del herpes bovino (Tabla 1). Es interesante que el efecto de λ -CGN es incluso similar al del compuesto antiviral sintético ribavirina que muestra un IC_{50} de 0,5 $\mu\text{g}/\text{mL}$ en el ensayo contra IPNV (Tabla 1). Esto último indica

Tabla 1: IC_{50} de compuestos antivirales frente a IPNV

Compuesto	IC_{50} ($\mu\text{g}/\text{mL}$)
λ -CGN	0,9
κ -CGN	8,1
ι -CGN	4,8
Ribavirina*	0,5
EICAR**	0,01

*Obtenido de Jashés et al., 2000 **Obtenido de Migus & Dobos, 1980

que los compuestos naturales pueden ser una fuente de potentes moléculas antivirales con mejores perfiles de seguridad y una potencia antiviral similar a la de los fármacos sintéticos. Para determinar la influencia del tamaño de λ -CGN en la actividad antiviral, evaluamos la actividad antiviral de oligo-carragenano (λ -OC) de aproximadamente 11 kDa comparado con el carragenano lambda de 226 kDa. Esta actividad antiviral fue menor en comparación con λ -CGN, lo que indica una pérdida de actividad antiviral con la disminución del tamaño del compuesto. Esto concuerda con estudios anteriores que muestran que la actividad antiviral de los polisacáridos sulfatados aumenta con su peso molecular (Witvrouw et al., 1997).

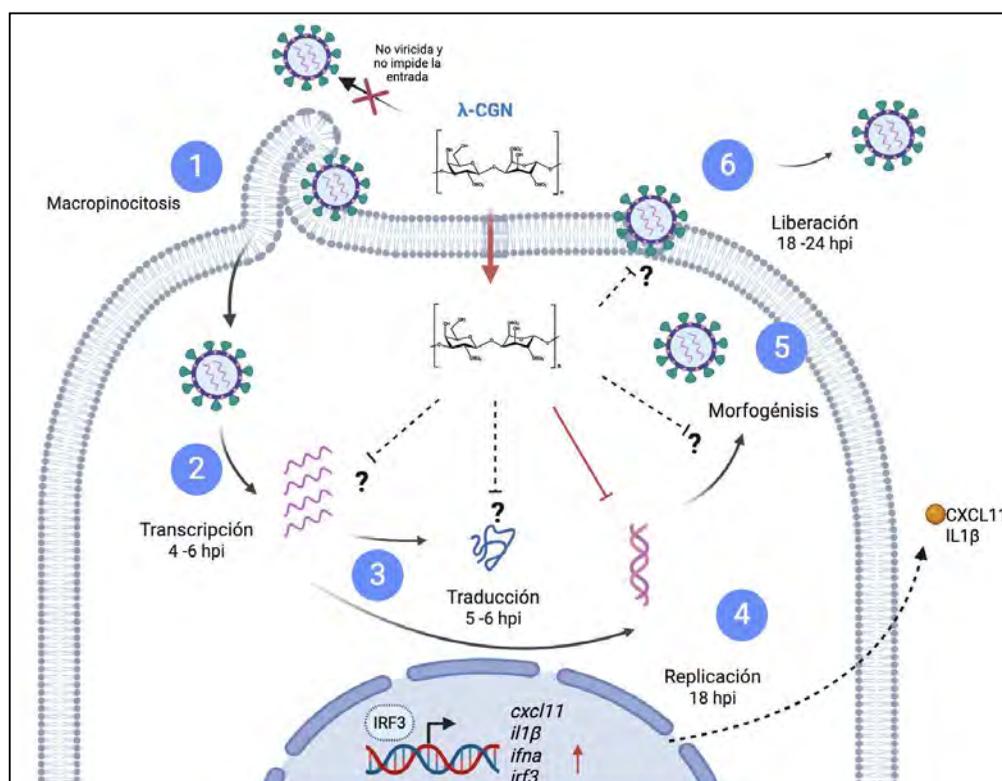


Figura 3: Modelo propuesto para mecanismo de acción antiviral de λ -CGN contra IPNV.

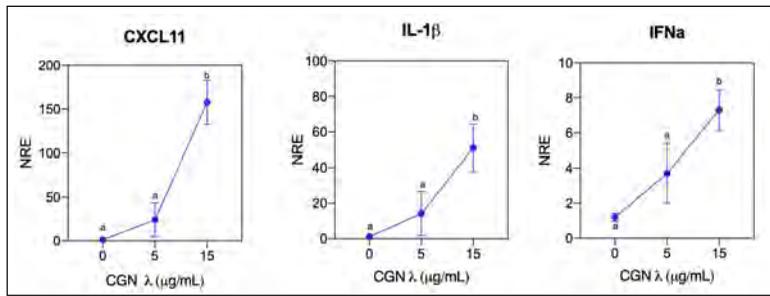


Figura 4: Expresión de genes inmunes en células CHSE-214 tratadas con •-CGN

Respecto los mecanismos de acción antiviral, en nuestro estudio observamos que el tratamiento del virus IPNV con •-CGN previo a la infección no redujo la formación de placas en las células CHSE-214 en ninguna de las concentraciones analizadas indicando que •-CGN no tiene actividad viricida sobre IPNV (Figura 3). Sin embargo, los experimentos de tiempo de adición revelaron que el tratamiento con •-CGN luego de la infección redujo significativamente las copias de ARN viral dentro de la célula y en el sobrenadante (Figura 3). Esto sugiere que •-CGN podría interferir con la replicación viral, posiblemente afectando la síntesis de ARN viral, la traducción de proteínas, el ensamblaje de partículas virales o su liberación, mientras que la unión/entrada no parece verse afectada (Figura 3). La inhibición de la síntesis de ARN genómico de IPNV por •-CGN fue dosis-dependiente, y la microscopía confocal confirmó la localización intracelular de •-CGN (Figura 4), lo que sugiere que la actividad antiviral puede deberse a interacciones del carragenano con compartimentos y eventos que ocurren a nivel citoplasmáticos, los cuales pueden incluir la transcripción, replicación, traducción de proteínas y morfogénesis viral.

Por otro lado, •-CGN induce la expresión de genes de la respuesta inmune antiviral al aumentar la expresión de CXCL11, una quimioquina que se conoce por su capacidad de regular el tráfico de macrófagos y células linfoides en peces (Valdés et al., 2022). También se observó el aumento de IL-1β después del tratamiento con células •-CGN lo que indica que se pueden activar funciones relacionadas con la inflamación como ocurre en macrófagos peritoneales de ratones con •-CGN (Lopes et al., 2020). •-CGN también regula positivamente la expresión del factor regulador de interferón-3, IRF3, que es uno de los factores de señalización más importantes que induce la expresión de IFN tipo I. Consistente con esto, el IFNα también fue inducido en células de salmónidos por efecto de •-CGN (Figura 4). Posiblemente, los Receptores de Reconocimiento de Patrones, varios de los cuáles ya han sido identificados en peces, podrían actuar como receptores de carragenanos activando las cascadas de señalización para la expresión de citoquinas pro-inflamatorias y de factores reguladores de la expresión de interferón (IRF), contribuyendo así al establecimiento del estado antiviral en la células susceptibles de infección. Por consiguiente, el carragenano lambda podría ejercer un efecto protector contra la infección por IPNV en salmónidos, actuando tanto de manera preventiva como terapéutica, lo que lo hace un antiviral especialmente útil en la salmonicultura.

REFERENCIAS

- Dopazo, C.P., 2020. The infectious pancreatic necrosis virus (IPNV) and its virulence determinants: What is known and what should be known. *Pathogens* 9, 94. <https://doi.org/10.3390/pathogens9020094>
- Espinoza, D., Laporte, D., Martínez, F., Sandino, A.M., Valdés, N., Moenne, A., Imarai, M., 2024. Lambda carrageenan displays antiviral activity against the infectious pancreatic necrosis virus (IPNV) by inhibiting viral replication and enhancing innate immunity in salmonid cells. *Int. J. Biol. Macromol* Vol. 282. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136875>
- Godoy, M., Kibenge, M. J., Montes de Oca, M., Pontigo, J. P., Coca, Y., Caro, D., Kusch, K., Suarez, R., Burbulis, I., & Kibenge, F. S., 2022. Isolation of a New Infectious Pancreatic Necrosis Virus (IPNV) variant from genetically resistant farmed Atlantic Salmon (*Salmo salar*) during 2021–2022. *Pathogens* 11, 1368. <https://doi.org/10.3390/pathogens11111368>
- Jashés, M., Mlynarz, G., De Clercq, E., & Sandino, A. M., 2000. Inhibitory effects of EICAR on infectious pancreatic necrosis virus replication. *Antiviral Research*, 45(1). [https://doi.org/10.1016/S0166-3542\(99\)00071-6](https://doi.org/10.1016/S0166-3542(99)00071-6)
- Lopes, A.H., Silva, R.L. Fonseca, M.D. Gomes, F.I. Maganin, A.G. Ribeiro, L.S. Cunha, T. M. Molecular basis of carrageenan-induced cytokines production in macrophage, *Cell Commun. Signal* 18 (2020) 1–17. <https://doi.org/10.1186/s12964-020-00621-x>
- Migus, D. O., & Dobos, P., 1980. Effect of ribavirin on the replication of infectious pancreatic necrosis virus in fish cell cultures. *Journal of General Virology*, 47(1). <https://doi.org/10.1099/0022-1317-47-1-47>
- SERNAPESCA, 2024. Informe con antecedentes sanitarios primer semestre 2024. <https://www.sernapesca.cl/app/uploads/2025/03/Informe-Sanitario-PRIMER-SEMESTRE-2024.pdf>
- Valdés, N., Cortés, M., Barraza, F., Reyes-López, F.E., Imarai, M., 2022. CXCL9-11 chemokines and CXCR3 receptor in teleost fish species, *Fish Shell. Immunol. Rep.* 3, 100068, <https://doi.org/10.1016/j.fsirep.2022.100068>
- Valenzuela B, Rodríguez FE, Modak B, Imarai M., 2018. Alpinone exhibited immunomodulatory and antiviral activities in Atlantic salmon. *Fish Shellfish Immunol.* 74:76-83. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2017.12.043>.
- Witvrouw, E., De Clercq, E., 1997. Sulfated polysaccharides extracted from sea algae as potential antiviral drugs, *Gen. Pharmacol.* 29 (1997) 497–511, [https://doi.org/10.1016/S0306-3623\(96\)00563-0](https://doi.org/10.1016/S0306-3623(96)00563-0)
- Vera J, Castro J, González A, Barrientos H, Matsuhira B, Arce P, Zúñiga G, Moenne A., 2011. Long-term protection against tobacco mosaic virus induced by the marine alga oligo-sulphated-galactan Poly-Ga in tobacco plants. *Mol Plant Pathol.* 12(5):437-47. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2010.00685.x>.
- Zia, K. M., Tabasum, S., Nasif, M., Sultan, N., Aslam, N., Noreen, A., & Zuber, M., 2017. A review on synthesis, properties and applications of natural polymer-based carrageenan blends and composites. *International Journal of Biological Macromolecules* 96, 282–301. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.11.095>

FINANCIAMIENTO

Beca doctoral ANID 21201137 (DE); DICYT-USACH 5392202MM (AM); FONDECYT Regular 1201664 y 1240741 ANID (MI).

Dra. Daniela Espinoza es Bioquímica de la Universidad de Santiago de Chile, titulada en el año 2017 bajo la dirección de las Dras. Brenda Modak y Beatriz Valenzuela. Es Doctora en Biotecnología por la misma Universidad y fue becaria ANID durante sus estudios de doctorado. Realizó su investigación en el Laboratorio de Inmunología, desarrollando el proyecto titulado "Evaluación de la actividad antiviral de carragenanos en salmónidos", enmarcado en una colaboración entre las Dras. Mónica Imarai y Alejandra Moenne. La Dra. Espinoza ha publicado 8 artículos WoS, presentado su trabajo en congresos nacionales e internacionales y co-dirigido tesis de estudiantes de pregrado. Contacto: daniela.espinoza@usach.cl



Dra. Ana María Sandino es Bioquímica, Viróloga, Doctora en Ciencias Biológicas y profesora titular de la Universidad de Santiago de Chile. Es directora del Laboratorio de Virología del Centro de Biotecnología Acuícola de la USACH, en donde ha desarrollado una exitosa línea de investigación estudiando aspectos moleculares y morfogénicos del Virus de la Necrosis Pancreática Infecciosa (IPNV). Es autora de más de 70 artículos (WoS) en biología molecular y virología animal y de peces. Ha aplicado a 6 patentes y obtenido más de 50 proyectos de investigación nacionales e internacionales. Co-fundadora y directora científica de dos empresas de biotecnología, Diagnostec S.A. y ActivaQ S.A e investigador senior y miembro del directorio de Ictio Biotechnologies. Es además emprendedora de Endeavor Internacional. Fue nominada entre las 100 mujeres Líderes de Chile en la categoría ciencias, por el Mercurio y Mujeres Empresarias el año 2020. En marzo del año 2020, reconvirtió su laboratorio de investigación a laboratorio de diagnóstico de SARS CoV-2, como parte de la red universitaria de laboratorios para apoyo al diagnóstico nacional de este virus. El Día Internacional de la Mujer del año 2021, WIZO Chile y la Embajada de Israel en Chile, la distinguió con el galardón "Mujer Destacada" en reconocimiento a décadas de trabajo de investigación en virología y formación de profesionales. Contacto: ana.sandino@usach.cl



Dra. Alejandra Moenne es Bioquímica de la Universidad de Concepción y Doctor en Ciencias de la Universidad de Paris XI, Francia y actualmente es académica y Profesora Titular de Universidad de Santiago de Chile. Durante los últimos 20 años, la Dra. Moenne ha trabajado en dos líneas de investigación, (i) Mecanismos fisiológicos, celulares y moleculares de la tolerancia y acumulación de cobre y cadmio en el alga marina *Ulva compressa* (Chlorophyta) y (ii) Mecanismos fisiológicos, celulares y moleculares de la estimulación del crecimiento y la defensa contra patógenos inducida por oligo-carragenanos de algas marinas en plantas terrestres, principalmente oligo-carragenano kappa. La ejecución de estas dos líneas de investigación ha dado origen a más de 70 publicaciones en revistas WoS tales como *Plant Physiology*, *Plant Cell and Environment*, *Plant Physiology and Biochemistry*, *Algal Research*, *BMC Plant Biology*, *International Journal of Molecular Sciences*, *BMC Genomics* y otras. La Dra. Moenne ha contribuido a la formación de más de 20 alumnos de pregrado y 5 alumnos de Doctorado. Contacto: alejandra.moenne@usach.cl



Dra. Mónica Imarai es Bioquímica, Inmunóloga, Dra. en Ciencias Biológicas y profesora titular en la Universidad de Santiago de Chile. La Dra. Imarai ha realizado investigación en inmunología, liderando un grupo que desde el año 2007 estudia los mecanismos de inmunidad adaptativa en la trucha y el salmón y compuestos naturales como potenciales inmunoestimulantes y antimicrobianos en peces. Su grupo identificó y caracterizó los linfocitos T cooperadores (Th) en la trucha arco iris, y actualmente estudia la participación de los linfocitos T y las citoquinas tipo Th1 y Th2 del salmón en la infección por *P. salmonis* y por el Virus de la Necrosis Pancreática Infecciosa (IPNV). El objetivo de estos estudios es entender si estos linfocitos T y citoquinas están involucrados en la protección o desarrollo de la enfermedad en los peces salmónidos. Su trabajo ha sido publicado en más de 80 artículos WoS y ha recibido financiamiento de Innova-Chile de CORFO, Fondo de Innovación Agraria, Fondo Newton-Picarte del RCUK-Conicyt, Research Council of Norway y Fondo Nacional de Desarrollo Científico Tecnológico (FONDECYT) y Dirección de Investigación Científica y Tecnológica (DICYT) de la Universidad de Santiago de Chile. Contacto: monica.imarai@usach.cl





SALMÓN MAGALLÁNICO 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.



LAMP, un gen, un color, una revolución para *Piscirickettsia salmonis*.



Alejandro Yáñez ^{1, 2, 3*, 5}, Adolfo Isla ^{2, 3}, Marcelo Aguilar ³, Sandra N. Flores-Martin ³, Jorge Mancilla-Schulz ⁴, Jaime Figueroa ², Felipe Almendras ⁵

¹ KeyBio Solution, Villa del Rey pasaje 2, 1522, Valdivia, Chile

² Interdisciplinary Center for Aquaculture Research (INCAR), Universidad de Concepción, Concepción, Chile

³ Laboratorio de Diagnóstico y terapia, VIDCA, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile

⁴ Mowi Chile S.A., Puerto Montt, Chile

⁵ Departamento de Investigación y Desarrollo, Greenvolution SP.A., Puerto Varas, Chile

* Autor correspondiente: ajyanezc@gmail.com

RESUMEN

En las aguas frías y brumosas del sur de Chile, una bacteria invisible cambió para siempre la historia de la salmonicultura: *Piscirickettsia salmonis*. Tres décadas después de su aparición en Chiloé, este patógeno sigue siendo la principal causa de mortalidad bacteriana en salmones del Atlántico, coho y trucha arcoíris. Sin embargo, los métodos diagnósticos actuales permanecen fragmentados, opacos y dependientes de genes in-house no validados. Aquí presentamos una solución clara, abierta y replicable: un sistema diagnóstico dual, basado en qPCR SYBR Green y amplificación isotérmica (LAMP), construido sobre secuencias genómicas únicas de *P. salmonis*. El corazón de este avance es una región del gen *tonB-r*; completamente exclusiva, sin homología conocida con ningún otro organismo. A partir de ella, desarrollamos ensayos que permiten no solo detectar la bacteria con sensibilidad extrema (10–20 fg), sino también distinguir sus variantes LF-89 y EM-90 mediante lectura colorimétrica simple, sin necesidad de equipamiento complejo. Este método es rápido, robusto y puede ser aplicado en terreno. Más aún, se ofrece como código abierto: un legado científico compartido, diseñado para estandarizar el diagnóstico, empoderar laboratorios regionales y promover una salmonicultura sustentable, ética y resiliente frente a los desafíos que el océano —y el futuro— aún nos tiene preparados.

INTRODUCCION

Hace más de tres décadas, en las costas australes de Chile, algo silencioso comenzó a alterar el equilibrio. Sin anuncios ni epifanías, los salmones coho comenzaron a morir entre redes y mareas sin causa aparente. En ese entonces, el diagnóstico fue incierto: una posible rickettsia, un enemigo intracelular mal definido. Solo más tarde la ciencia confirmaría su identidad: *Piscirickettsia salmonis*, una bacteria sin parangón, endémica y devastadora, que desde

entonces ha reescrito las reglas sanitarias de la salmonicultura chilena y amenaza hoy con cruzar fronteras biogeográficas hacia el hemisferio norte, con reportes recientes en Canadá y Noruega (Rozas & Enríquez, 2014; González et al., 2023). Actualmente, la piscirickettsiosis (SRS) continúa siendo la principal causa de mortalidad infecciosa en la salmonicultura chilena, con prevalencias superiores al 60 % en brotes activos de *Salmo salar*, *Oncorhynchus kisutch* y *O. mykiss* (SERNAPESCA, 2022). Las pérdidas económicas anuales estimadas superan los 700 millones de dólares, afectando la competitividad, la trazabilidad sanitaria y la percepción internacional del salmón chileno como alimento sostenible (Asche et al., 2021; Figueroa et al., en Pontigo et al., 2021).

A pesar de su relevancia, el diagnóstico molecular de *P. salmonis* ha estado marcado por una fragmentación crítica. Durante más de dos décadas se ha utilizado una PCR anidada basada en un gen ribosómico de especificidad cuestionada (Marshall et al., 1998), incapaz de distinguir infecciones activas de portaciones crónicas. A falta de un protocolo unificado y validado externamente, numerosos laboratorios recurren a ensayos in-house con genes blanco no publicados, sin validación cruzada, lo cual impide una trazabilidad robusta y compromete la transparencia diagnóstica (Avenidaño-Herrera et al., 2021; Isla et al., 2022). Frente a esta necesidad urgente, el laboratorio del Dr. Alejandro Yáñez desarrolló una plataforma dual de diagnóstico y genotipificación basada en qPCR con SYBR Green y amplificación isotérmica LAMP, publicada y validada en entornos clínicos y de campo (Isla et al., 2024). El eje central de esta innovación es la identificación de una región única y altamente específica del gen *tonB-r*; exclusiva de *P. salmonis*. Su especificidad fue confirmada mediante búsquedas exhaustivas contra todos los genomas de patógenos acuáticos disponibles en NCBI, el genoma completo de *Salmo salar*, y otros patógenos intracelulares como *Francisella*, *Legionella* y *Coxiella* (Yáñez et al., 2012; Yáñez et al., 2014).

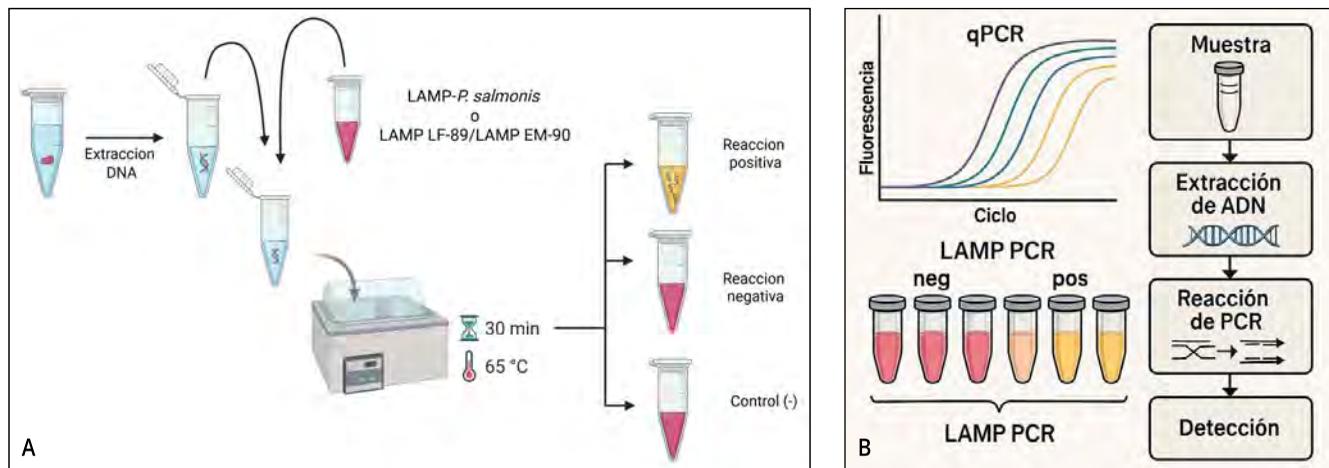


Figura 1: A) Esquema de flujo de trabajo para la implementación del protocolo LAMP en la detección y genotipificación de *Piscirickettsia salmonis*. A partir de extractos de ADN obtenidos de muestras clínicas o cultivos bacterianos, se realiza: (1) extracción y purificación de ADN, (2) amplificación isotérmica a 65 °C durante 30 minutos con cebadores específicos para el gen *tonB-r* (identificación de especie) o para los genes *Nitronate monooxygenase* y *HAD family acid phosphatase* (genogrupos LF-89 y EM-90, respectivamente), y (3) lectura visual del resultado por viraje de color: de rojo púrpura (negativo) a amarillo (positivo).

B) Comparación esquemática entre qPCR y LAMP para la detección de *P. salmonis*. A la izquierda, curvas de amplificación por fluorescencia en qPCR. En la parte inferior, resultado visual de la amplificación por LAMP: rosado indica reacción negativa; amarillo, reacción positiva. A la derecha, diagrama general del flujo de trabajo desde la muestra hasta la detección para ambas metodologías. LAMP destaca por su rapidez, simplicidad operativa y bajo requerimiento instrumental, ideal para diagnóstico en terreno.

La secuencia seleccionada, de 200 nucleótidos, demostró especificidad absoluta en análisis *in silico* y experimental, sin falsos positivos. Esta región fue liberada públicamente como blanco diagnóstico abierto, replicable y adaptable por laboratorios en distintas regiones del mundo, como estándar independiente para vigilancia epidemiológica y control sanitario (Isla et al., 2024; Nourdin-Galindo et al., 2017). A esta base se suman dos ensayos genotípicos dirigidos a genes específicos de los principales genogrupos clínicos: *Nitronate Monooxygenase* (LF-89) y *HAD Family Acid Phosphatase* (EM-90), seleccionados a partir de análisis de pangenoma completo y validados en muestras clínicas y de terreno (Isla et al., 2021; Nourdin-Galindo et al., 2017).

La plataforma LAMP permite realizar estas detecciones con alta sensibilidad y especificidad en menos de 60 minutos, utilizando solo calor constante (65 °C) y lectura colorimétrica directa. Su implementación en terreno es viable mediante bloques calefactores o baños María, sin requerir termocicladores ni equipamiento especializado, lo que la hace ideal para laboratorios rurales y centros de diagnóstico acreditados por SERNAPESCA (Notomi et al., 2000; Yeh et al., 2006; Uribe et al., 2022). Esta estrategia no busca propiedad ni exclusividad. Propone un nuevo estándar: protocolos abiertos, validados, comparables y éticamente compartidos. Representa un legado de bien público, una invitación a avanzar hacia una salmonicultura más transparente, resiliente y justa. Y quizás, también, un modelo para pensar cómo la ciencia puede ser puente —y no barrera— entre tecnología, ética y océano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se emplearon aislados representativos de *Piscirickettsia salmonis* correspondientes a los genogrupos clínicos LF-89 y EM-90, previamente caracterizados mediante MLST y pangenómica comparativa. Los cultivos se realizaron en medio líquido AUSTRAL-SRS y medios sólidos sin sangre tipo AUSTRAL-agar, incubados a 18 °C bajo agitación constante (100 rpm) y atmósfera enriquecida en CO₂ (5 %). Las suspensiones bacterianas se ajustaron a una concentración de 107 UFC/mL mediante recuento directo en cámara de Petroff-Hausser y absorbancia OD₆₀₀. El ADN genómico fue extraído usando el kit High Pure PCR Template (Roche Diagnostics), y cuantificado con espectrofotometría NanoDrop. Los extractos fueron normalizados a 20 ng/μL. La región blanco del gen *tonB-r* fue seleccionada mediante análisis comparativo frente a más de 50 genomas bacterianos acuáticos y el genoma completo de *Salmo salar*, sin hallarse reactividad cruzada. Se diseñaron cebadores para qPCR SYBR Green y LAMP utilizando Primer-BLAST y PrimerExplorer, apuntando al gen *tonB-r* para identificación de especie, y a los genes *Nitronate monooxygenase* (LF-89) y *HAD family acid phosphatase* (EM-90) para genotipificación.

Las reacciones qPCR se realizaron en un termociclador StepOne con SYBR Green Master Mix (Bio-Rad), usando un protocolo de 95 °C por 5 min, seguido de 40 ciclos de 95 °C por 15 s y 60 °C por 30 s. Para LAMP se utilizó el kit WarmStart Colorimetric Master Mix (NEB) incubado a 65 °C durante 30 minutos en bloques calefactores portátiles, sin necesidad de termociclador ni lectura instrumental. La interpretación visual se basó en el viraje de color: rosado (negativo) o amarillo (positivo). El flujo completo, desde la

muestra hasta la detección colorimétrica, se representa en la Figura 1A). La comparación esquemática entre qPCR y LAMP, incluyendo curvas de amplificación, color final y flujos paralelos, se muestra en la Figura 1B) La especificidad fue evaluada frente a ADN de *Vibrio anguillarum*, *Renibacterium salmoninarum*, *Francisella noatunensis* y otras nueve especies bacterianas relevantes, sin obtener amplificación cruzada. La sensibilidad se determinó mediante diluciones seriadas de ADN purificado desde 10 ng hasta 1 fg. Finalmente, se evaluaron 60 muestras de campo de tejidos de salmón del Atlántico y trucha arcoíris, provenientes de brotes activos y controles negativos. Se comparó el rendimiento de ambos métodos con resultados de cultivo y PCR convencional, verificándose la equivalencia diagnóstica y la aplicabilidad del protocolo en contextos operacionales rurales y descentralizados.

Se emplearon aislados representativos de *Piscirickettsia salmonis* pertenecientes a los genogrupos LF-89 y EM-90, previamente caracterizados por MLST y análisis de pangenoma. Las cepas se cultivaron en medio AUSTRAL-SRS y medios sólidos sin sangre a 18 °C, bajo agitación constante y atmósfera con 5 % de CO₂. Las suspensiones se ajustaron a 107 UFC/mL mediante conteo en cámara de Petroff-Hausser y OD600. El ADN genómico fue extraído con el kit High Pure PCR Template (Roche) y cuantificado por NanoDrop. La secuencia blanco *tonB-r* fue seleccionada tras verificar su unicidad mediante alineamientos BLAST frente al genoma completo de *Salmo salar* y más de 50 bacterias acuáticas, sin hallar homología cruzada.

La región codificante del gen *tonB-r* mostró una identidad evolutivamente única: 120 nucleótidos sin paralelos en ningún organismo conocido, incluyendo vertebrados, invertebrados y patógenos marinos. Esta singularidad fue reforzada por su estructura tridimensional, modelada con AlphaFold 3, que reveló un dominio β-barrel central estabilizado por hélices a periféricas, típica de receptores TonB-dependientes en bacterias Gram-negativas (Figura 2). Esta arquitectura sugiere una función conservada en la adquisición de hierro y se mantiene inalterada entre los genogrupos LF-89 y EM-90. Se diseñaron cebadores LAMP específicos para esta región, además de ensayos dirigidos a genes exclusivos de los

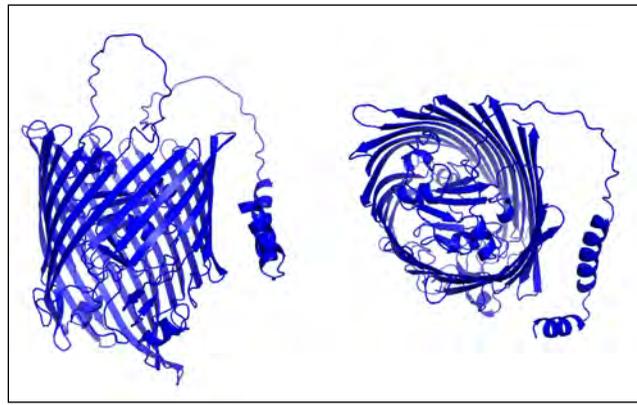


Figura 2: Modelamiento tridimensional de la proteína *TonB-r* de *Piscirickettsia salmonis*.

Estructura predicha mediante inteligencia artificial con AlphaFold 3. A la izquierda, vista lateral de la arquitectura tridimensional, donde se observa un barril β compuesto por 22 láminas antiparalelas que atraviesan la membrana externa, estabilizadas por hélices a periféricas. A la derecha, vista desde arriba que revela el cierre casi cilíndrico del barril, organizado como una espiral de pliegues β concéntricos, típica de receptores TonB-dependientes en bacterias Gram-negativas. Esta configuración estructural sugiere una alta restricción evolutiva, ya que cualquier mutación en regiones clave comprometería la estabilidad del canal y la capacidad de captar hierro. La conservación del plegamiento en ambos genogrupos (LF-89 y EM-90) refuerza su valor como blanco diagnóstico universal, estructuralmente inviolable.

genogrupos clínicos: *Nitronate monoxygenase* (LF-89) y *HAD family acid phosphatase* (EM-90). La Tabla 1 resume todas las secuencias utilizadas para detección y genotipificación. La mezcla LAMP totalizó 25 μL, incluyendo WarmStart LAMP Master Mix (NEB), 60 pmol de FIP/BIP, 5 pmol de F3/B3, 30 pmol de LoopF o LoopB y 1 μL de ADN (10–50 ng). La incubación se realizó a 65 °C durante 30 minutos, seguida de inactivación a 85 °C por 2 minutos. El resultado se interpretó visualmente por viraje de color: rosado indica negativo, amarillo confirma amplificación positiva. El flujo completo desde la muestra hasta la lectura visual se ilustra en la Figura 1 A y B. La especificidad del ensayo fue validada frente a ADN purificado de múltiples patógenos acuáticos no relacionados, incluyendo *Renibacterium salmoninarum*, *Tenacibaculum maritimum*, *Aeromonas salmonicida*, *Vibrio ordalii* y *Flavobacterium psychrophilum*. Solo las muestras positivas de *P. salmonis* (LF-89 y EM-90) generaron reacciones amarillas, confirmando una especificidad diagnóstica del 100 %. La sensibilidad del sistema se estableció en 20 fg de ADN genómico, equivalente al rendimiento observado con qPCR SYBR Green, que detectó hasta 10 fg con Ct < 30. La repetibilidad fue excelente (CV < 5 % en triplicados técnicos). En condiciones de campo, se evaluaron 19 cultivos puros de *P. salmonis* y 30 muestras clínicas previamente clasificadas, con resultados de concordancia del 100 % en LAMP, y un índice $k \cdot 0,95$ en comparación con qPCR. Las ventajas comparativas de ambas plataformas, incluyendo equipamiento requerido y operatividad, se presentan en la Figura 1.

Para la genotipificación, se implementaron dos ensayos LAMP independientes. En el primero, dirigido al gen *Nitronate monoxygenase*, se observó amplificación positiva únicamente en cepas LF-89 (10/10), sin reactividad en EM-90 ni bacterias de control. El segundo, basado en el gen *HAD family acid phosphatase*, resultó positivo exclusivamente en cepas EM-90 (9/9). Ambos ensayos fueron validados en laboratorio y en campo, mostrando precisión absoluta: 10/10 LF-89 y 9/9 EM-90 correctamente tipificados en cultivos puros; y 26/30 muestras clínicas clasificadas como LF-89 y 4/30 como EM-90, sin reacciones cruzadas ni ambigüedad (Figura 4). Esta plataforma LAMP, basada en blancos genéticos únicos y validados, demostró ser rápida, específica y portable. Representa una herramienta eficaz

para diagnóstico descentralizado, trazabilidad de brotes y vigilancia sanitaria en salmicultura chilena y global. Así, lo que en principio fue una secuencia genómica silenciosa —una hebra de 200 nucleótidos entre miles— se reveló como una llave estructural, precisa y luminosa. El gen *tonB-r*, único en su clase, no solo cumplía con los requisitos técnicos de especificidad, estabilidad y ausencia de homología cruzada; también emergía como un signo molecular de identidad pura para *Piscirickettsia salmonis*. Su arquitectura tridimensional, al desplegarse en espirales y láminas como un sello biológico indeleble, selló su destino como blanco diagnóstico. No se trataba solo de amplificar un fragmento: era invocar un fragmento del genoma que jamás respondió en otras especies, y que ahora —al iluminarse de amarillo en un tubo— contaba una historia completa de presencia, identidad y precisión.

3.1 Identificación de secuencias únicas a nivel de especie y genogrupos:

Ha sido un hallazgo de excepcional unicidad molecular: el gen *tonB* receptor (*tonB-r*) de *Piscirickettsia salmonis*, históricamente asociado al transporte activo de hierro, contiene un fragmento de 120 nucleótidos absolutamente exclusivo a nivel global. No presenta homología detectable con genomas de vertebrados, invertebrados ni patógenos marinos secuenciados hasta la fecha (Isla et al., 2021; Yáñez et al., 2024). Este descubrimiento convierte a *tonB-r* en un biomarcador diagnóstico insustituible, tanto para contexto clínico como para vigilancia epidemiológica. De un catálogo de 1.801 secuencias codificantes conservadas entre los genogrupos LF-89 y EM-90 (Isla et al., 2021), se identificaron 269 secuencias exclusivas mediante análisis BLASTn contra todos los genomas bacterianos del NCBI. De todas ellas, *tonB-r* sobresalió por su identidad perfecta entre genogrupos y su nula homología con organismos no pertenecientes a *P. salmonis*.

La singularidad funcional de este gen radica en su escasa afinidad por sideróforos convencionales (Yáñez et al., 2012a), lo que obliga al patógeno a operar en ambientes ricos en hierro, y por tanto, a conservar rigurosamente la arquitectura estructural del dominio *TonB-r*. Esta región resulta esencial para la viabilidad y virulencia del patógeno (Yáñez et al., 2012b; Yáñez et al., 2013). El modelado estructural realizado con AlphaFold 3 reveló una organización tridimensional clásica de los receptores TonB-dependientes: un barril β cilíndrico flanqueado por hélices a periféricas, elementos esenciales tanto para la estabilidad conformacional como para la transducción energética (Figura 2). Apoyados en este análisis pangénomico y estructural, diseñamos cebadores específicos dirigidos a dos plataformas diagnósticas complementarias: qPCR con SYBR Green y un ensayo colorimétrico LAMP, ambos enfocados sobre el mismo fragmento inmutable del gen *tonB-r*. En las pruebas de calibración, ambos métodos alcanzaron un límite de detección entre 10 y 20 fg de ADN genómico —equivalente a unas pocas copias bacterianas—, sin reacción cruzada con ADN de *Salmo salar* ni con patógenos comunes en centros de cultivo, como *Renibacterium salmoninarum* y *Flavobacterium psychrophilum* (Notomi et al., 2000; Savan et al., 2005; Yeh et al., 2006; Yáñez et al., 2024). Esta

combinación de ultra-sensibilidad y especificidad absoluta convierte a ambos ensayos en candidatos idóneos para transformarse en estándar de oro para la detección de *P. salmonis*, tanto en laboratorios centralizados como en entornos de terreno.

Para ilustrar su versatilidad, se comparó el formato cuantitativo de la qPCR —basado en amplificación fluorescente en tiempo real— con la simplicidad del LAMP, que opera a temperatura constante (65 °C) y traduce la presencia del patógeno en un simple cambio de color visible en menos de 30 minutos, sin necesidad de termociclador (Notomi et al., 2000; Yeh et al., 2006). En validaciones de laboratorio, ambos métodos detectaron positividad en 19/19 cultivos puros. En muestreos clínicos, identificaron con precisión 30/30 peces previamente diagnosticados, alcanzando un coeficiente de concordancia $k = 0,95$ y un coeficiente de variación técnico inferior al 5 % (Isla et al., 2021; Yáñez et al., 2024). Gracias a su rapidez, bajo costo y robustez, proponemos su incorporación oficial por entidades como SERNAPESCA y el SAG, estandarizando el diagnóstico y fortaleciendo la bioética y trazabilidad en la salmicultura chilena. Este enfoque se apoya en el análisis funcional de las secuencias codificantes comunes a LF-89 y EM-90, clasificadas bajo categorías COG: 273 genes asociados a procesos celulares y señalización, 402 relacionados al almacenamiento y procesamiento de información, 467 genes metabólicos y 264 con funciones aún poco caracterizadas (Isla et al., 2021). Al filtrar específicamente las secuencias metabólicas y realizar un BLASTn exhaustivo, se identificaron 269 exclusivas de *P. salmonis*, entre las cuales *tonB-r* emergió como el marcador perfecto por su invariabilidad intergenotípica y su exclusividad evolutiva. El modelado tridimensional (Figura 2) confirmó la integridad estructural del dominio *tonB-r*, organizado como un barril transmembrana con láminas β antiparalelas estabilizadas por hélices a periféricas. Esta arquitectura sugiere que cualquier mutación estructural sería deletérea, lo que refuerza su valor como blanco diagnóstico estable y universal. Así, *tonB-r* no solo se convierte en un marcador estructural, taxonómico y funcional sin precedentes, sino que también ofrece una solución real y concreta a una deuda histórica de la salmicultura chilena: la ausencia de un diagnóstico estandarizado, validado y replicable para uno de sus patógenos más letales.

3.2 Ensayo LAMP para la Identificación Específica de *P. salmonis*:

Se diseñó y validó un ensayo de amplificación isotérmica mediada por bucle (LAMP) dirigido al gen *tonB* receptor (*tonB-r*), recientemente caracterizado como único y específico de *Piscirickettsia salmonis* en todos los genomas bacterianos conocidos. Este gen actúa como una verdadera “huella molecular”, una firma genómica que no se repite en ninguna otra especie acuática ni terrestre. Aprovechando esa exclusividad, desarrollamos un ensayo LAMP que traduce un proceso técnico complejo en una lectura visual simple: un viraje de color que permite detectar al patógeno sin necesidad de equipamiento avanzado. A diferencia del PCR convencional, que requiere ciclos térmicos sucesivos, LAMP funciona en un solo paso a 65 °C, facilitando su aplicación en cualquier laboratorio básico con un baño María o un bloque calefactor portátil.

La validación inicial se realizó utilizando ADN genómico purificado de aislados representativos de los genogrupos LF-89 y EM-90, junto con ADN de bacterias patógenas acuícolas filogenéticamente no relacionadas: *Aeromonas salmonicida*, *Tenacibaculum maritimum*, *Renibacterium salmoninarum*, *Flavobacterium psychrophilum* y *Vibrio ordalii*. Las reacciones con ADN de *P. salmonis* viraron de rosado a amarillo en menos de 30 minutos, mientras que todas las demás permanecieron sin cambio de color, demostrando una especificidad analítica del 100 % (Figura 3).

El diseño de este sistema partió de una diana altamente conservada: un fragmento de 120 nucleótidos del gen *tonB-r* sin homología en ningún otro organismo conocido, identificado mediante un cribado pangenómico exhaustivo contra más de 50 genomas bacterianos y el genoma completo de *Salmo salar* (Isla et al., 2021). Para ello, se diseñaron seis oligonucleótidos (F3, B3, FIP, BIP, LoopF y LoopB) que se anidan en zonas contiguas del fragmento, acelerando la formación de estructuras en bucle y la multiplicación exponencial del ADN objetivo. El principio de detección es sencillo: el reactivo indicador cambia de rosado a amarillo al disminuir el pH producto de la amplificación, lo cual proporciona una señal inequívoca, directa y visible sin instrumentos de detección. Para confirmar su aplicabilidad real, el ensayo fue evaluado en 19 cultivos puros de *P. salmonis* (LF-89 y EM-90), con resultados positivos en el 100 % de los casos. Asimismo, se analizaron 30 muestras clínicas de peces infectados, previamente diagnosticadas mediante métodos convencionales, las cuales resultaron positivas mediante LAMP. La concordancia con qPCR fue perfecta, con un coeficiente $k \cdot 0,95$, confirmando su robustez incluso en condiciones clínicas heterogéneas.

El ensayo demostró un límite de detección de tan solo 20 fg de ADN, equivalente al rendimiento de qPCR (~10 fg), pero sin necesidad de termociclador ni reactivos fluorescentes. Además, mostró una reproducibilidad sobresaliente, con un coeficiente de variación inferior al 5 % entre operadores distintos, garantizando resultados estables y consistentes. En términos de operatividad, este ensayo puede ser ejecutado en laboratorios móviles o instalaciones rurales con recursos limitados. En menos de media hora, y mediante un simple cambio de color, se obtiene un resultado de alta precisión que puede sustentar decisiones sanitarias rápidas y confiables. Estos hallazgos validan al ensayo LAMP basado en *tonB-r* como una herramienta diagnóstica de nueva generación: rápida, robusta y específica, ideal para su integración en protocolos oficiales de vigilancia epidemiológica.

3.3 Ensayos LAMP para la genotipificación de los genogrupos LF-89 y EM-90:

Más allá de identificar la especie, distinguir entre sus variantes genéticas resulta crucial para anticipar la dinámica clínica de *Piscirickettsia salmonis* y definir estrategias de control específicas. Las diferencias entre los genogrupos LF-89 y EM-90 se asocian con patrones distintos de virulencia, persistencia y respuesta a antibióticos, por lo que una herramienta que permita diferenciarlos rápida y precisamente representa un avance significativo en la vigilancia sanitaria acuícola (Nourdin-Galindo et al., 2017). Con ese propósito, desarrollamos dos ensayos independientes de Amplificación Isotérmica Mediada por Bucle (LAMP), cada uno dirigido a un gen exclusivo: *Nitronate monoxygenase* para el genotipo LF-89, y *HAD family acid phosphatase* para EM-90. Ambas dianas fueron seleccionadas mediante análisis de pangenoma completo, con verificación cruzada de ausencia de homología en otros microorganismos, incluyendo patógenos de salmónidos y microbiota ambiental. La mecánica diagnóstica replica el protocolo LAMP ya validado para el gen *tonB-r*: una incubación de 30 minutos a 65 °C en mezcla isotérmica, seguida de una lectura visual directa basada en el viraje de color del indicador pH-sensible. Una reacción positiva se manifiesta con claridad en tubos que cambian de rojo púrpura a amarillo, mientras que los negativos mantienen su color original.

En pruebas realizadas con 19 aislamientos clínicos de *P. salmonis*, los resultados fueron precisos y excluyentes: 10 aislados viraron a amarillo únicamente en presencia del gen de LF-89, y 9 lo hicieron exclusivamente ante el blanco correspondiente a EM-90. No se observó amplificación cruzada entre genogrupos ni reacción positiva en bacterias no relacionadas utilizadas como

controles negativos (Figura 4A y 4B). Cuando se evaluaron 30 muestras clínicas provenientes de peces previamente diagnosticados, los resultados fueron igualmente robustos: 26 fueron identificadas como pertenecientes al genotipo LF-89 y 4 como EM-90, replicando exactamente la identidad genotípica determinada previamente mediante secuenciación convencional. Esta concordancia del 100 % en condiciones reales de campo posiciona a estos ensayos LAMP como herramientas confiables, rápidas y de bajo costo para la discriminación genotípica en entornos operacionales. El nivel de precisión alcanzado —sin reacciones cruzadas ni resultados ambiguos— demuestra que esta doble plataforma puede integrarse al diagnóstico molecular de rutina, permitiendo no solo la identificación de especie, sino también la caracterización inmediata de su linaje genético. Esta distinción temprana resulta clave para definir terapias, anticipar brotes severos y establecer rutas de trazabilidad sanitaria en sistemas productivos complejos.

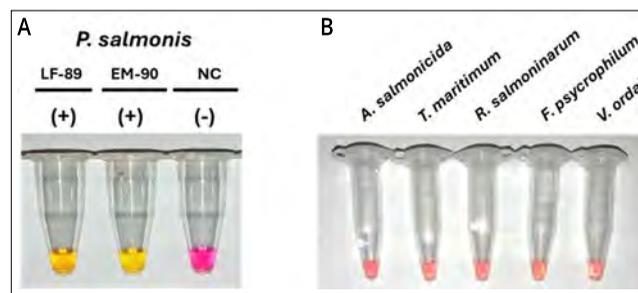


Figura 3: Evaluación de la especificidad del ensayo LAMP para la detección de *P. salmonis*. A) Una reacción positiva se indica por un viraje de color de rosado a amarillo. B) Reacciones negativas conservan el color rojo púrpura o anaranjado, dependiendo del lote del kit LAMP utilizado (NEB Biolabs).

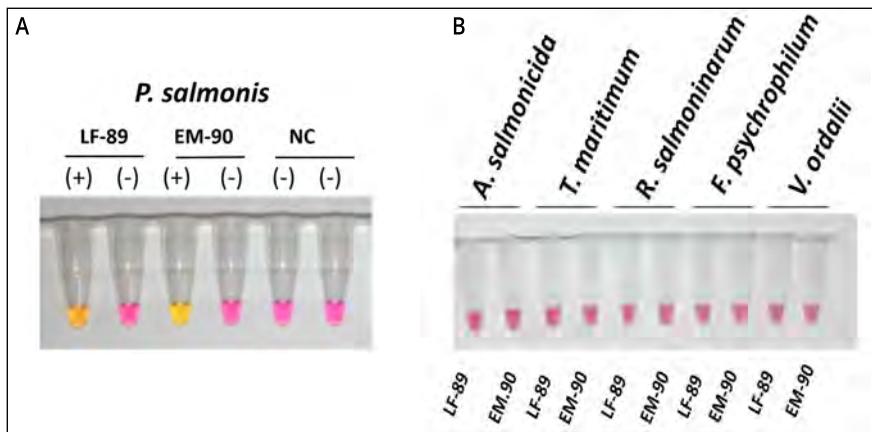


Figura 4: Evaluación de la especificidad de los ensayos LAMP para la genotipificación de *P. salmonis*.

A) Reacciones con ADN genómico de aislados representativos de los genogrupos LF-89 y EM-90.

B) Reacciones con ADN de otras bacterias patógenas de salmónidos (*A. salmonicida*, *T. maritimum*, *R. salmoninarum*, *F. psychrophilum*, *V. ordalii*). El viraje de color de rojo púrpura a amarillo indica amplificación positiva; reacciones negativas mantienen su color original.

3.4 Plataforma unificada para identificación y genotipificación por LAMP:

Con el fin de simplificar la toma de decisiones diagnósticas y reducir los tiempos de respuesta en terreno, implementamos una plataforma LAMP que combina en paralelo los ensayos dirigidos al gen *tonB-r* (identificación de especie) y a los genes *Nitronate monoxygenase* y *HAD family acid phosphatase* (genotipificación). Esta estrategia permite realizar, en menos de 40 minutos, la detección de *P. salmonis* y la discriminación precisa entre sus genogrupos clínicos LF-89 y EM-90. La aplicación de este sistema dual en 19 aislamientos puros permitió identificar con absoluta precisión 10 cepas como LF-89 y 9 como EM-90, sin reacciones cruzadas ni falsos positivos. En muestras clínicas de peces provenientes de brotes confirmados ($n = 30$), la plataforma clasificó correctamente 26 como LF-89 y 4 como EM-90, replicando con fidelidad los resultados obtenidos por secuenciación genómica (Isla et al., 2021; Yáñez et al., 2024).

Lo más destacable es que este diagnóstico dual no requiere más que dos tubos por muestra, un bloque calefactor básico y una simple lectura visual. La detección de color —amarillo para positivo, rosado para negativo— permite una interpretación rápida sin necesidad de interpretación técnica especializada, haciéndolo ideal para laboratorios periféricos, centros de cultivo y veterinarios en terreno. Este enfoque no solo mejora la eficiencia diagnóstica, sino que también dignifica el acceso al conocimiento sanitario en condiciones donde la infraestructura es limitada. Permite a los equipos técnicos actuar con rapidez, precisión y autonomía, evitando el traslado de muestras a laboratorios centrales, lo que disminuye tiempos, costos y pérdidas asociadas a la progresión de brotes. Así, esta doble estrategia basada en LAMP no solo representa una mejora metodológica, sino una verdadera herramienta de justicia diagnóstica. Permite la estandarización de protocolos, la trazabilidad genética de los brotes, y un control sanitario más equitativo y eficaz

en toda la red salmonera. Con ella, damos un paso real hacia una salmonicultura más ética, sustentable y científicamente soberana.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Los resultados de este estudio demuestran que la Amplificación Isotérmica Mediada por Bucle (LAMP) representa una herramienta diagnóstica eficaz, rápida y altamente específica para la detección y genotipificación de *Piscirickettsia salmonis*, el principal agente etiológico de la piscirickettsiosis en Chile (Fryer et al., 1992; Maisey et al., 2017; Figueroa et al., 2019). La validación experimental del gen *tonB-r* como blanco común a los genogrupos LF-89 y EM-90 permitió desarrollar un ensayo robusto y portable, capaz de identificar al patógeno tanto en

cultivos como en muestras clínicas recogidas en terreno (Isla et al., 2024). Este fragmento de *tonB-r* fue validado como único a nivel global —no solo frente a bacterias marinas y patógenos intracelulares, sino también contra el genoma de *Salmo salar*— tras un extenso cribado bioinformático basado en el pangenoma de *P. salmonis* (Isla et al., 2021).

Su relevancia estructural fue confirmada mediante modelado con AlphaFold 3, revelando un barril β estabilizado por hélices α , cuya conformación restringe mutaciones funcionales sin comprometer el transporte activo de hierro (Yáñez et al., 2012a; 2012b). Esta arquitectura lo convierte en un blanco molecular ideal para diagnóstico específico de especie, manteniéndose inalterado entre genogrupos clínicos (Yáñez et al., 2013). Complementariamente, los ensayos dirigidos a los genes exclusivos *Nitronate monoxygenase* (LF-89) y *HAD family acid phosphatase* (EM-90) demostraron alta especificidad para discriminar entre genogrupos sin reacciones cruzadas (Isla et al., 2021; Isla et al., 2024). Esta capacidad es crítica, considerando que LF-89 y EM-90 difieren en virulencia, evasión inmune y eficacia vacunal (Nourdin-Galindo et al., 2017), lo que justifica su diferenciación temprana para orientar estrategias terapéuticas y de contención epidemiológica.

Desde una perspectiva regulatoria, la técnica LAMP supera las limitaciones prácticas de la PCR convencional, especialmente la PCR anidada empleada actualmente en laboratorios de diagnóstico autorizados en Chile, cuyos problemas de reproducibilidad, sensibilidad variable y falta de transparencia han sido ampliamente documentados. LAMP, por el contrario, permite detección directa en campo, sin termociclador, con lectura colorimétrica visual de alta confiabilidad (Notomi et al., 2000; Savan et al., 2005; Yeh et al., 2006). Este trabajo no solo entrega herramientas operativas, sino que

también visibiliza una necesidad crítica: revisar las prácticas regulatorias actuales. Aunque Chile cuenta con una red de laboratorios autorizados por SERNAPESCA, no existe un protocolo diagnóstico validado por terceros ni sistemas de Ring Test obligatorios. Cada laboratorio emplea genes in-house no publicados, sin controles cruzados con especies filogenéticamente cercanas como *Tenacibaculum maritimum*, cuya prevalencia ha aumentado sin una vigilancia molecular activa. Esta opacidad metodológica y el uso de genes promiscuos como el 16S rRNA comprometen la confiabilidad de los diagnósticos y distorsionan los reportes epidemiológicos (Policy Brief, 2024). Como respuesta, proponemos una solución abierta, validada y reproducible. El gen *tonB-r* se presenta como un nuevo estándar de oro para diagnóstico de especie, acompañado por herramientas de genotipificación específicas, adaptables a sistemas descentralizados o rurales. Invitamos a la comunidad científica —académica, regulatoria e industrial— a validar y discutir estos hallazgos, a incorporarlos en sus rutinas diagnósticas y a consolidar una política sanitaria basada en evidencia científica, no en tradición ni conveniencia comercial.

Finalmente, la adopción de tecnologías como LAMP puede contribuir directamente a la reducción del uso innecesario de antibióticos, mejorar la trazabilidad de brotes y fortalecer la transición hacia una salmicultura ética, sostenible y alineada con los principios de salud única (One Health) y producción libre de antimicrobianos (Yáñez et al., 2014). Esta propuesta no busca propiedad, sino legado: que el conocimiento circule libremente, que el diagnóstico se democratice y que la ciencia se ponga al servicio de quienes cuidan la vida... incluso en el fondo del mar.

BIBLIOGRAFÍA estilo Nature compacto

- Bravo S, Campos M. Coho salmon syndrome in Chile. *J Fish Biol* 1989;34:145–7.
- Figueroa J, González MP, Soto D. Challenges for fish disease management in Chilean salmon farming. *Rev Aquacult* 2019;11:403–21.
- Fryer JL et al. *P. salmonis* gen. nov., sp. nov. *Int J Syst Bacteriol* 1992;42:120–6. <https://doi.org/10.1099/00207713-42-1-120>
- Isla A et al. Multiplex PCR genotyping of *P. salmonis*. *Front Microbiol* 2021;12:673216. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.673216>
- Isla A et al. Manuscrito en prensa. 2024.
- Maisey K et al. Immune response of salmonids to *P. salmonis*. *Fish Shellfish Immunol* 2017;66:207–16.
- Nourdin-Galindo G et al. Pan-genome analysis of *P. salmonis*. *Front Cell Infect Microbiol* 2017;7:459. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2017.00459>
- Notomi T et al. Loop-mediated isothermal amplification of DNA. *Nucleic Acids Res* 2000;28:e63. <https://doi.org/10.1093/nar/28.12.e63>
- Policy Brief. Brechas regulatorias en el diagnóstico de *P. salmonis*. *Obs. Ciencia Pública*. 2024.
- Savan R et al. LAMP in fish pathogens. *J Fish Dis* 2005;28:573–81. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2761.2005.00677.x>
- Yeh HY et al. Rapid detection of *Edwardsiella ictaluri*. *J Microbiol Methods* 2006;65:268–75. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2005.07.013>
- Yáñez AJ et al. Broth medium for *P. salmonis*. *Dis Aquat Org* 2012;97:197–205. <https://doi.org/10.3354/dao02403>
- Yáñez AJ et al. Blood-free solid media for *P. salmonis*. *J Fish Dis* 2012;36:587–91. <https://doi.org/10.1111/jfd.12034>
- Yáñez AJ et al. MIC testing of *P. salmonis*. *J Fish Dis* 2013;37:505–9. <https://doi.org/10.1111/jfd.12144>
- Yáñez AJ et al. Membrane vesicles in *P. salmonis*. *Front Cell Infect Microbiol* 2014;7:420. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2017.00420>

4 MANERAS MÁS DE CONECTAR CON NOSOTROS



AquaBC

1. MICROSCOPIA Y MONITOREO AMBIENTAL



2. ASESORÍA Y CAPACITACIONES

3. MUESTREO Y ANÁLISIS AMBIENTAL



4. MANTENCIÓN Y REPARACIÓN DE EQUIPOS

Visítenos en: www.aquabc.cl
Contáctenos: team@aquabc.cl
Llámenos: +56 9 2116 0096

CAPAS FINAS DE FITOPLANCTON TÓXICO: UN PROBLEMA QUE ESCAPA A LOS MÉTODOS TRADICIONALES DE DETECCIÓN



Patricio A. Díaz^{1,2*}, Álvaro Aravena¹, Bárbara Cantarero^{1,3}, Iván Pérez-Santos^{1,4}, Ángela Baldrich^{1,2}, Valentina Iturra⁵, Michael Araya⁶, David Cassis⁷, Carolina Miranda¹, Rebeca Rantul¹, Robinson Altamirano¹, Gonzalo Álvarez^{6,8,9}

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

² CeBiB, Universidad de Los Lagos, Puerto Montt, Chile

³ Programa de Doctorado en Biología y Ecología Aplicada, Universidad Católica del Norte, Coquimbo, Chile

⁴ Centro de Investigación Oceanográfica COPAS COASTAL, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

⁵ Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

⁶ Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Algas (CIDTA), Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Católica del Norte, Coquimbo, Chile

⁷ AquaBC Chile Spa, Puerto Varas, Chile

⁸ Departamento de Acuicultura, Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Católica del Norte, Coquimbo, Chile

⁹ Center for Ecology and Sustainable Management of Oceanic Islands (ESMOI), Departamento de Biología Marina, Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Católica del Norte, Coquimbo, Chile

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

Las Floraciones Algales Nocivas (FAN) de microalgas productoras de ficotoxinas que se acumulan a través de las redes tróficas —incluyendo especies productoras de toxinas emergentes— presentan una elevada recurrencia e intensidad en el sistema de fiordos y canales de la Patagonia Chilena (Díaz and Figueroa, 2023). Algunas de estas ficotoxinas se encuentran entre los compuestos bioactivos más potentes (van Egmond, 2004). En la zona austral se han registrado los eventos más intensos a nivel global asociados a toxinas paralizantes y diarreicas pero sus impactos socioeconómicos han sido escasamente cuantificados (Mardones et al., 2020). Los efectos negativos como consecuencia de las FAN no solo están asociados con la salud humana, sino también con el desarrollo de actividades de acuicultura de bivalvos, lo que se traduce en un escaso o nulo desarrollo de este tipo de actividades en zonas de alta ocurrencia de eventos FAN, como son las regiones de Aysén y Magallanes (Díaz et al., 2019).

La abundancia y diversidad de las poblaciones fitoplanctónicas están continuamente afectadas por procesos físicos, químicos y biológicos de múltiple escala y sus interacciones. Así, la distribución y abundancia del fitoplancton se caracteriza por la formación de agregaciones y parches en un amplio rango de escalas espaciales y temporales. Haury et al. (1978) basados en el modelo de Stommel (1963), presentaron un excelente marco conceptual para considerar las escalas espaciotemporales de los patrones de procesos oceánicos. El objetivo de este modelo fue revisar el espectro de patrones observados en el mundo oceánico en relación con los factores clave para su generación y mantenimiento. La determinación de las escalas de variabilidad

espaciotemporal de estos procesos fue muy importante para la comprensión de la dinámica de las poblaciones planctónicas (Dickey, 1991).

De acuerdo con Haury et al. (1978), las escalas de distribución planctónica parecen formar un continuum, pero los autores consideraron conveniente acotarlas en categorías, que consideran desde la macroescala (>1.000 km) hasta la microescala (1 cm < 1m). A su vez, estas categorizaciones espaciales son variables en el tiempo y se ven afectadas por procesos: a) de largo término (ciclos climáticos interanuales), b) estacionales (< 1 año), c) de varios días-semanas (cambios meteorológicos, ciclos mareales), y d) de entre un día y varias horas (ciclos mareales semi-diurnos, ritmos circadianos de migración vertical). Así, puede haber diferencias de más de 9 órdenes de magnitud entre las distintas escalas temporales y espaciales que afectan a la distribución de los organismos. De esta forma, la distribución del fitoplancton puede ser afectada por procesos físicos que se desarrollan en escalas tiempo corta (ej. minutos y horas) y cuyo efecto en el espacio es local (ej. un fiordo, un canal o un golfo), hasta fenómenos interanuales que se desarrollan a escalas de tiempo decadales y cuyos efectos se pueden observar a escala espacial regional y/o global (ej. eventos “El Niño” y “La Niña”, los ríos atmosféricos y los sistemas de baja y alta presión atmosféricos) (Díaz et al., 2023; Montero et al., 2017; Pérez-Santos et al., 2019).

Las floraciones de dinoflagelados tóxicos, incluidas especies del género *Dinophysis*, se deben principalmente a interacciones biofísicas que ocurren a microescala (siempre que exista una fuente de inóculo y disponibilidad de presas). Las poblaciones

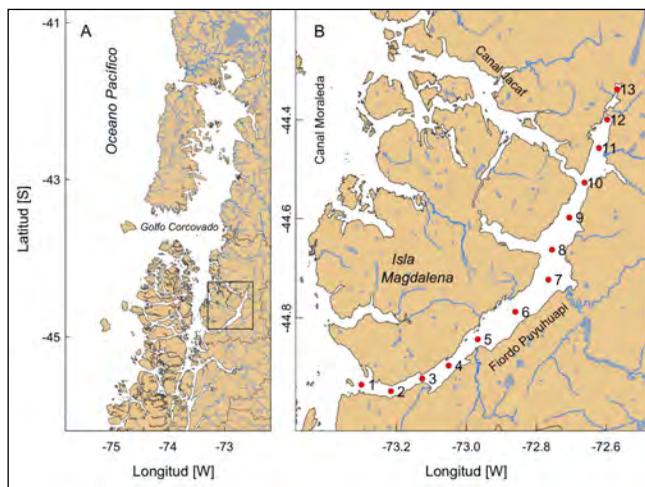


Figura 1: Área de estudio localizada en el mar interior de la Patagonia Noroccidental (A) y fiordo Puyuhuapi localizado en la sección norte de la región de Aysén. Los círculos rojos indican la localización de las 13 estaciones visitadas en febrero de 2024.

de alta densidad celular suelen agruparse en estructuras verticales denominadas "capas finas" (CF) en las que los parámetros ambientales y fisiológicos difieren considerablemente de las capas de agua inmediatamente superiores e inferiores. Algunos investigadores propusieron una serie de criterios que permiten identificar las estructuras de este tipo: i) coherencia espacial en el plano horizontal y en el tiempo; ii) espesor de la capa fina (inferior a 3 m medidos en la zona de intensidad media del perfil vertical); iii) el máximo de concentración (plancton, clorofila-a u otro parámetro), debe superar significativamente (5 veces) los valores basales de la columna de agua (Deksheniaks et al., 2001; Donaghay et al., 1992). Para entender la formación, mantenimiento y disipación de una CF de fitoplancton, es necesario considerar los mecanismos físicos, químicos y biológicos que propician su formación (Díaz et al., 2014). Además, estas CF pueden escapar a la detección mediante métodos de monitoreo convencionales (Escalera et al., 2012) y su estudio requiere mediciones de alta resolución temporal y espacial de parámetros ambientales como la turbulencia, los ciclos de mareas y los ritmos circadianos (GEOHAB, 2008, 2010).

Estudios previos realizados en sistemas de fiordos han demostrado que *Dinophysis acuta* y *D. acuminata*, dos especies productoras de toxinas lipofílicas, presentan marcadas diferencias fenológicas (Lindahl et al., 2007;

Swan et al., 2018). Además, cuando ambas especies coexisten, sus máximos celulares ocupan diferentes capas de la columna de agua (Baldrich et al., 2021; Baldrich et al., 2023). Los patrones específicos de ambas especies se han evaluado de forma poco adecuada en los fiordos chilenos, donde los monitoreos mensuales se han desarrollado utilizando un muestreador de manguera integrado. Cabe resaltar que desde mediados de la década del 80', el grupo internacional de expertos en el estudio de floraciones algales excepcionales ha recomendado el uso de este dispositivo para los diferentes programas de monitoreo (ICES, 1986; Lindahl, 1986). Sin embargo, este método no permite detectar la segregación de nichos, ni realizar observaciones fenológicas detalladas en especies fitoplanctónicas tóxicas, como es el caso de *Dinophysis*. La distribución irregular de las especies de *Dinophysis*, que frecuentemente se presentan en bajas densidades (<200 células L⁻¹), dificulta su detección y/o puede llevar a subestimaciones de su máximo celular (Escalera et al., 2012). Esta situación se agrava en sistemas altamente heterogéneos, como los fiordos patagónicos, caracterizados por múltiples microambientes en los que se promueve el desarrollo o la agregación de diferentes especies (Alves de Souza et al., 2019; Díaz et al., 2024b).

El fiordo Puyuhuapi (Fig. 1), localizado en la sección norte de la región de Aysén, Patagonia Noroccidental, ha sido clasificado como un "Hotspot" (conocido así por sus siglas en inglés) de FAN a nivel global. Lo anterior, debido a la elevada ocurrencia e intensidad de floraciones de especies productoras de toxinas lipofílicas, como son *Dinophysis acuta* (Díaz et al., 2021), *D. acuminata* (Baldrich et al., 2023) y *Protoceratium reticulatum* (Díaz et al., 2024a), transformándose así en un laboratorio natural para el estudio de este tipo de especies. Durante febrero de 2024, en

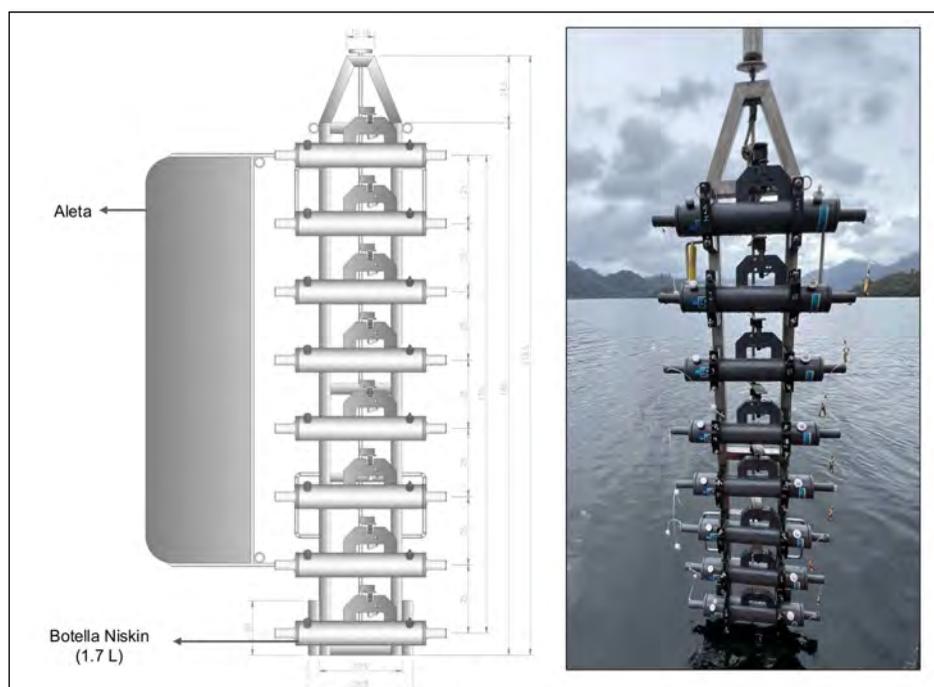


Figura 2: Muestreador de escala fina (MEF) utilizado en los experimentos del fiordo Puyuhuapi.

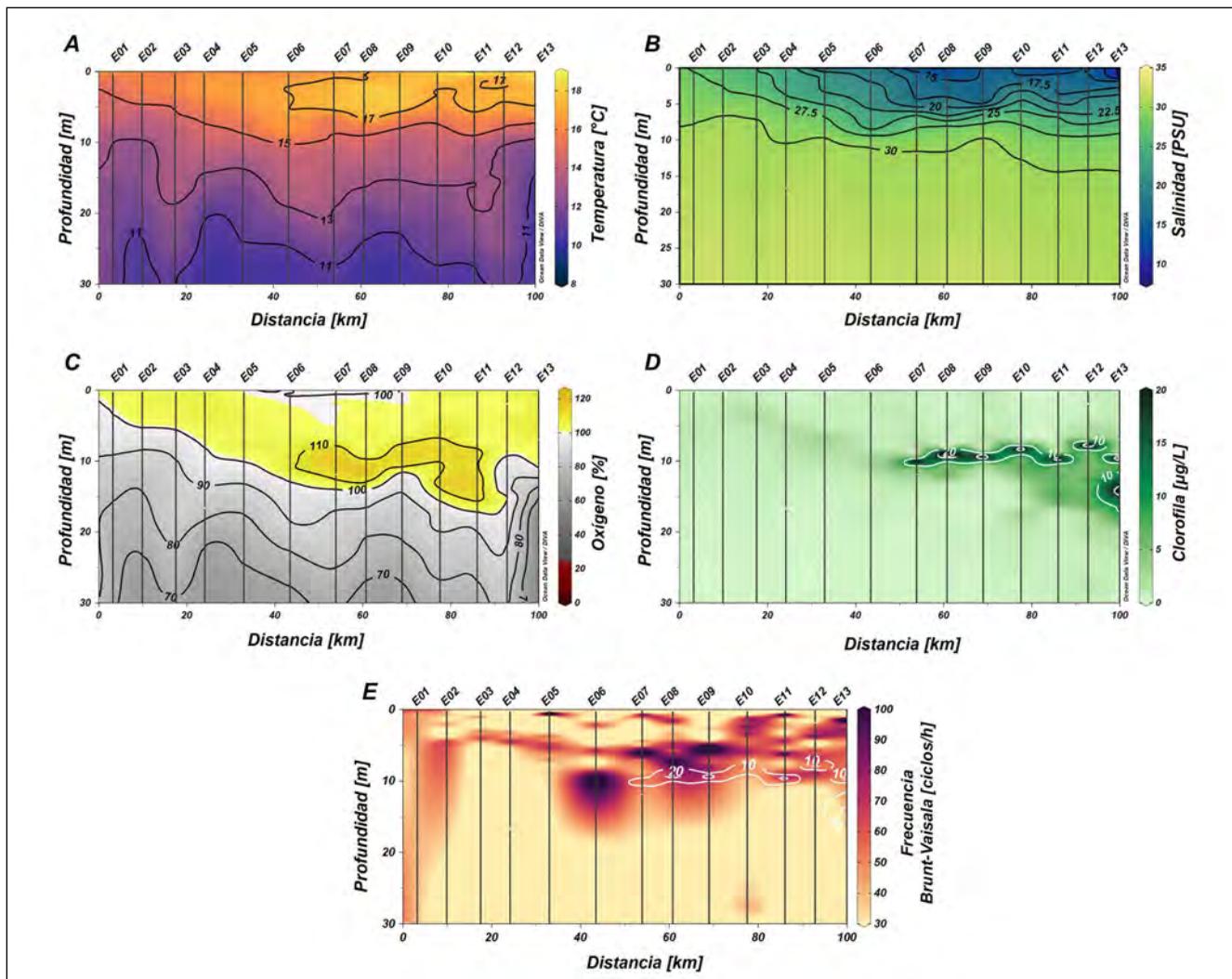


Figura 3: Distribución espacial de las condiciones hidrográficas a lo largo de los 100-km de longitud del fiordo Puyuhuapi entre superficie y 30 m. A) Temperatura (°C), B) Salinidad (psu), C) Oxígeno disuelto (% saturación), D) Clorofila a ($\mu\text{g L}^{-1}$) y E) Frecuencia de Brunt-Väisälä (ciclos/h).

el marco del proyecto FONDECYT 1231220, se realizó una campaña oceanográfica que consideró 13 estaciones de muestreo a lo largo de los 100 km de longitud del fiordo (Fig. 1). En cada estación se realizaron perfiles verticales utilizando un perfilador de la columna de agua conocido como CTD de la marca RBR. Además de medir la temperatura y salinidad del agua, este instrumento tiene sensores adicionales de oxígeno disuelto y fluorescencia, permitiendo obtener entre la superficie y el fondo las características hidrográficas del fiordo. Por otro lado, se colectaron muestras de agua para análisis de fitoplancton entre la superficie y 20 m, a intervalos de 2 m. Finalmente, en la cabecera del fiordo (estación 13), se realizaron mediciones en alta resolución utilizando un Muestreador de Escala Fina (MEF), una versión adaptada del instrumento francés denominado FSS (Fine Scale Sampler) (Lunven et al., 2005). El MEF está compuesto por 8 botellas horizontales de 1,7 litros de capacidad, las cuales están montadas en una estructura en forma de escalera y separadas cada 25 cm (Fig. 2). Esta estructura es sumergida a la profundidad deseada y

posteriormente las botellas son cerradas de forma simultánea mediante la activación de un mecanismo de cierre utilizando un mensajero metálico. En el caso de la estación 13, la primera botella del MEF fue cerrada a 8 m de profundidad considerando que la capa fina de clorofila-a se localizó a 9 m (Figs. 3-4). Así, las 8 botellas del MEF colectaron muestras cada 25 cm entre 8 y 9,75 m de profundidad, una resolución espacial de muestreo nunca antes utilizada en este sistema de fiordos.

La distribución espacial de las condiciones hidrográficas a lo largo de fiordo Puyuhuapi durante febrero de 2024 evidenció una marcada estratificación termohalina (Fig. 3). La temperatura mostró valores más elevados en la capa superficial, alcanzando $>17^\circ\text{C}$ en la zona cercana a la cabecera del fiordo (estación 13). A su vez, las temperaturas superficiales hacia la confluencia con el canal Moraleda (estación 1), disminuyeron aproximadamente 2°C , generando así un gradiente térmico a lo largo de la superficie del fiordo (Fig. 3A). Por su parte, la salinidad mostró una clara

disminución en la capa superficial entre la zona media del fiordo y su cabecera. Esto es coincidente con las localizaciones de los ríos Cisnes (cercano a la estación 7) y Ventisquero (cercano a la estación 11), cuyos aportes de agua dulce generan una reducción de la densidad, alcanzando valores de salinidad cercanos a 15 psu (Fig. 3B). Además, se observó un aumento progresivo de la salinidad con la profundidad y la presencia de valores más elevados en la superficie de la zona de conexión con el canal Moraleda, evidenciando un mayor aporte de agua oceánica. Por otra parte, la presencia de una haloclina bien definida entre los 5 y 10 m de profundidad, mostró una fuerte estratificación vertical. En cuanto a la saturación de oxígeno disuelto, se registraron valores elevados en la capa superficial, superando el 100 % cerca de los 15 m de profundidad próximo a la cabecera, y una disminución gradual hacia la boca del fiordo (Fig. 3C). Es habitual encontrar altos niveles de oxígeno disuelto en superficie debido al intercambio con la atmósfera; sin embargo, saturaciones superiores al 100 % sugieren la presencia de actividad fotosintética por parte de microalgas, que generan y liberan oxígeno a la columna de agua. Finalmente, la distribución de clorofila-a reveló la presencia de concentraciones elevadas a lo largo de todo el fiordo, con una mayor acumulación en el sector norte, entre 5 y 20 metros de profundidad, justo por debajo de la haloclina y

formando estructuras en CF (Fig. 3D). Esta acumulación sugiere una clara correlación con los niveles elevados de saturación de oxígeno observados en la misma zona, localizados bajo la capa de máxima estratificación que alcanzó valores cercanos a 100 ciclos/h (Fig. 3E).

En la cabecera del fiordo (estación 13), el perfil vertical de CTD evidenció una fuerte estratificación termohalina caracterizada por una intensa picnoclina entre 5 y 7 m de profundidad (Figs. 3E-4A). Una intensa CF de clorofila-a con un máximo de $46,5 \mu\text{g L}^{-1}$ fue localizada entre 9,2 y 10,2 m de profundidad, inmediatamente por debajo de la picnoclina (Fig. 4A). Sumado a esto, las concentraciones de oxígeno disuelto fueron superiores a $280 \mu\text{mol L}^{-1}$ (>100% saturación) en la capa superficial entre superficie y 11 m de profundidad. En cuanto a la distribución vertical de *Dinophysis acuta* y *D. acuminata*, se evidenció un patrón vertical segregado en el espacio (Fig. 4B), algo que ha sido descrito en trabajos previos para este tipo de poblaciones en fiordos Norpatagónicos (Baldrich et al., 2021). De esta forma, para *D. acuminata* se observó un máximo de 9.000 células L^{-1} a 4 m de profundidad, y para *D. acuta* una densidad máxima de 20.400 células L^{-1} a 8 m (Fig. 4B). Estas diferencias espaciales se deben a que *D. acuta* es más susceptible al daño provocado por altas

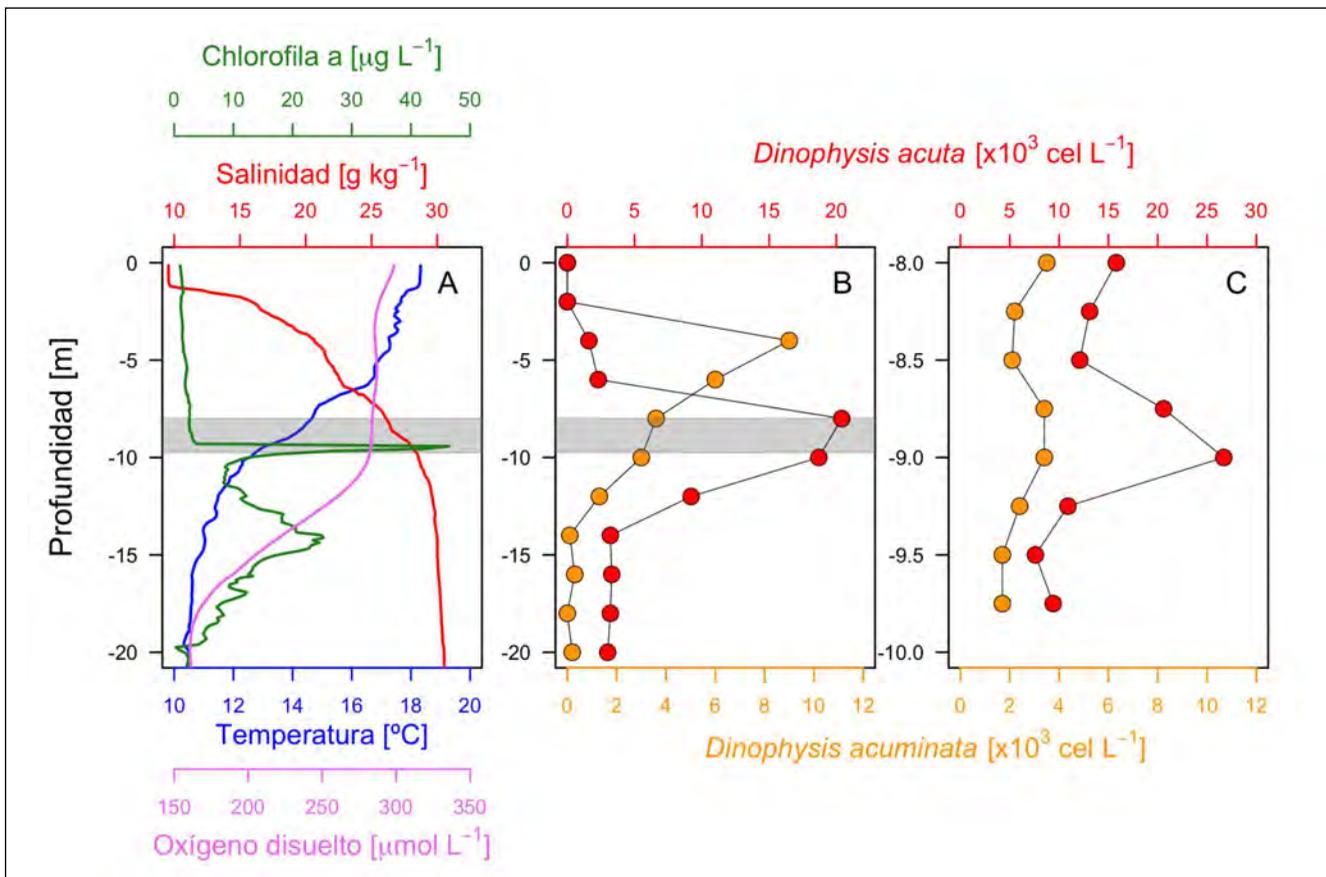


Figura 4: A) Perfiles verticales de temperatura, salinidad y concentración de clorofila-a colectados en la estación 13 (cabecera del fiordo). El área sombreada en gris indica el rango donde se recolectaron las muestras mediante el MEF. B) Distribución vertical de *Dinophysis acuta* y *Dinophysis acuminata* (0-20 metros). C) Distribución vertical de alta resolución de *D. acuta* y *D. acuminata* entre 8 y 10 metros.

intensidades de luz respecto a *D. acuminata*, por lo cual, sus poblaciones se desarrollan de mejor forma en capas más profundas (García-Portela et al., 2018). Por su parte, los resultados de las muestras colectadas con el MEF, las cuales coincidieron con el máximo celular de *D. acuta*, evidenciaron diferencias aún más grandes a pequeña escala. Una densidad máxima de 26.700 células L⁻¹ fue detectada a 9 m, mientras que a 25 cm más hacia el fondo (9,25 m), esta densidad se redujo a 10.900 células L⁻¹, es decir, un 59% menos (Fig. 4C). Estas diferencias se acentúan aún más si la comparación es realizada con la muestra colectada a 9,5 m, donde la reducción es de un 72%.

Los resultados obtenidos en el fiordo Puyuhuapi claramente destacan la gran heterogeneidad vertical en la distribución de las variables físicas, químicas y biológicas que habitualmente son observadas en el extenso sistema de fiordos de la Patagonia Chilena. La presencia de una marcada estratificación termohalina en la columna de agua, junto al patrón distribución horizontal de las isotermas en la sección norte del fiordo, indican una limitada mezcla vertical (Fig. 3). Esta condición favorece la acumulación de microalgas bajo la haloclina, promoviendo así la formación de CF de fitoplancton. En contraste, en la sección sur del fiordo, el aumento en la mezcla vertical, reflejado en isotermas e isohalinas más inclinadas, sugiere un proceso de homogenización de la columna de agua que genera la disipación de estructuras en CF. Este tipo de variabilidad a microescala supone un gran desafío para los diferentes programas de monitoreo regular existentes en la zona, ya que las estructuras en CF muchas veces escapan a los métodos tradicionales de detección. En este sentido, nuestros resultados ponen de manifiesto la gran variabilidad espacial a pequeña escala existente en uno de los fiordos más impactados por eventos FAN en las últimas décadas y abren aún más interrogantes sobre los procesos fisicoquímicos implicados en la formación, mantención y declive de CF de fitoplancton de diferentes especies tóxicas.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo fue financiado por el proyecto FONDECYT 1231220. Los autores agradecen especialmente a Manuel Díaz Vidal por el apoyo técnico durante la campaña de muestreo.

REFERENCIAS

- Alves de Souza, C., Iriarte, J.L., Mardones, J.I., 2019. Interannual variability of *Dinophysis acuminata* and *Protoceratium reticulatum* in a Chilean fjord: Insights from the realized niche analysis. *Toxins* 11(1), 19.
- Baldrich, A., Pérez-Santos, I., Álvarez, G., Reguera, B., Fernández-Pena, C., Rodríguez-Villegas, C., Araya, M., Álvarez, F., Barrera, F., Karasiewicz, S., Díaz, P.A., 2021. Niche differentiation of *Dinophysis acuta* and *D. acuminata* in a stratified fjord. *Harmful Algae* 103, 102010.
- Baldrich, A.M., Díaz, P.A., Álvarez, G., Pérez-Santos, I., Schwerter, C., Díaz, M., Araya, M., Nieves, M.G., Rodríguez-Villegas, C., Barrera, F., Fernández-Pena, C., Arenas-Urbe, S., Navarro, P., Reguera, B., 2023. *Dinophysis acuminata* or *Dinophysis acuta*: What makes the difference in highly stratified fjords? *Mar. Drugs* 21, 64.
- Deksheniaks, M., Donaghay, P., Sullivan, J., Rines, J., Osborn, T., Twardowski, M., 2001. Temporal and spatial occurrence of thin phytoplankton layers in relation to physical processes. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 223, 61-71.
- 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(1-2), 39-50.
- Díaz, P.A., Álvarez, G., Figueroa, R.I., Garreaud, R., Pérez-Santos, I., Schwerter, C., Díaz, M., López, L., Pinto-Torres, M., Krock, B., 2023. From lipophilic to hydrophilic toxin producers: Phytoplankton succession driven by an atmospheric river in western Patagonia. *Mar. Pollut. Bull.* 193, 115214.
- 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., 2024a. 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.
- Díaz, P.A., Figueroa, R.I., 2023. Toxic algal bloom recurrence in the era of global change: Lessons from the Chilean Patagonian fjords. *Microorganisms* 11, 1874.
- Díaz, P.A., Pérez-Santos, I., Álvarez, G., Garreaud, R., Pinilla, E., Díaz, M., Sandoval, A., Araya, M., Álvarez, F., Rengel, J., Montero, P., Pizarro, G., López, L., Iriarte, L., Igor, G., Reguera, B., 2021. Multiscale physical background to an exceptional harmful algal bloom of *Dinophysis acuta* in a fjord system. *Sci. Total Environ.* 773, 145621.

- Díaz, P.A., Pérez-Santos, I., Baldich, A.M., Álvarez, G., Schwerter, C., Araya, M., Aravena, Á., Cantarero, B., Carbonell, P., Díaz, M., Godoy, H., Reguera, B., 2024b. Small-Scale biophysical interactions and *Dinophysis* blooms: Case study in a strongly stratified Chilean fjord. *Journal of Marine Science and Engineering* 12, 1716.
- Díaz, P.A., Ruiz-Villarreal, M., Velo-Suárez, L., Ramilo, I., Gentien, P., Lunven, M., Fernand, L., Raine, R., Reguera, B., 2014. Tidal and wind-event variability and the distribution of two groups of *Pseudo-nitzschia* species in an upwelling-influenced Ría. *Deep Sea Res. II* 101, 163-179.
- Dickey, T.D., 1991. The emergence of concurrent high resolution physical and bio-optical measurements in the upper ocean and their applications. *Rev. Geophys.* 29(3), 383-413.
- Donaghay, P.L., Rines, H.M., Sieburth, J.M., 1992. Simultaneous sampling of fine scale biological, chemical and physical structure in stratified waters. *Archiv fuer Hydrobiologie* 36, 97-108.
- Escalera, L., Pazos, Y., Doval, M.D., Reguera, B., 2012. A comparison of integrated and discrete depth sampling for monitoring toxic species of *Dinophysis*. *Mar. Pollut. Bull.* 64, 106-113.
- García-Portela, M., Riobó, P., Reguera, B., Garrido, J., Blanco, J., Rodríguez, F., 2018. Comparative ecophysiology of *Dinophysis acuminata* and *D. acuta*: effect of light intensity and quality on growth, cellular toxin content and photosynthesis. *J. Phycol.*, doi:10.1111/jpy.12794.
- GEOHAB, 2008. Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms, GEOHAB Core Research Project: HABS in Stratified Systems, In: Gentien, P., Reguera, B., Yamazaki, H., Fernand, L., Berdalet, E., Raine, R. (Eds.). IOC and SCOR, Paris, France and Newark, Delaware, USA, p. 59.
- GEOHAB, 2010. Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms, GEOHAB Core Research Project: HABS in Fjords and Coastal Embayments. A. Cembella, L. Guzmán, S. Roy, J. Diogène (Eds.), IOC and SCOR, Paris, France and Newark, Delaware USA, 57 pp.
- Haurly, L.R., McGowan, J.A., Wiebe, P.H., 1978. Patterns and processes in the time-space scales of plankton distribution, In: Steele, J.H. (Ed.), *Spatial Pattern in Plankton Communities*. Springer Science, Plenum, New York, pp. 277-327.
- ICES, 1986. Report of the Working Group on Exceptional Algal Blooms. 17-19 March 1986, International Council for the exploration of the Sea, Hirtshals, Denmark, ICES C.M. 1986/L.: 26, p. 31.
- Lindahl, O., 1986. A dividable hose for phytoplankton sampling. Report of the working group on phytoplankton and management of their effects. International Council for the Exploration of the Sea, C.M.1986/L: 1926, annex 1983.
- Lindahl, O., Lundve, B., Johansen, M., 2007. Toxicity of *Dinophysis* spp. in relation to population density and environmental conditions on the Swedish west coast. *Harmful Algae* 6, 218-231.
- Lunven, M., Guillaud, J.F., Youenou, A., Crassous, M., Berric, R., Le Gall, E., Kerouel, R., Labry, C., Aminot, A., 2005. Nutrient and phytoplankton distribution in the Loire river plume (Bay of Biscay, France) resolved by a new Fine Scale Sampler. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* 65, 94-108.
- Mardones, J.I., Holland, D.S., Anderson, L., Le Bihan, V., Gianella, F., Clément, A., Davidson, K., Sakamoto, S., Yoshida, T., Trainer, V.L., 2020. Estimating and mitigating the economic costs of harmful algal blooms on commercial and recreational shellfish harvesters, Economic costs of HABS on commercial and recreational shellfish harvesters. *PICES Scientific Report No. 59*, pp. 66-83.
- Montero, P., Daneri, G., Tapia, F., Iriarte, J.L., Crawford, D., 2017. Diatom blooms and primary production in a channel ecosystem of central Patagonia. *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 45(5), 999-1016.
- Pérez-Santos, I., Seguel, R., Schneider, W., Linford, P., Donoso, D., Navarro, E., Amaya-Cárcamo, C., Pinilla, E., Daneri, G., 2019. Synoptic-scale variability of surface winds and ocean response to atmospheric forcing in the eastern austral Pacific Ocean. *Ocean Sci. Discuss.* 15, 1247-1266.
- Stommel, H., 1963. Varieties of Oceanographic Experience: The ocean can be investigated as a hydrodynamical phenomenon as well as explored geographically. *Science* 139(3555), 572-576.
- Swan, S.C., Turner, A.D., Bresnan, E., Whyte, C., Paterson, R.F., McNeill, S., Mitchell, E., Davidson, K., 2018. *Dinophysis acuta* in Scottish coastal waters and its influence on Diarrhetic Shellfish Toxin profiles. *Toxins* 10, 399.
- van Egmond, H.P., 2004. Natural toxins: risks, regulations and the analytical situation in Europe. *Anal. Bioanal. Chem.* 378(5), 1152-1160.

MICROALGAS DE NIEVE Y SU ROL EN LOS PROCESOS DE LA CRIÓSFERA ANTÁRTICA



Pirjo Huovinen^{1,2}, Iván Gómez^{1,2}

¹ Instituto de Ciencias Marinas y Limnológicas, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile

² Centro Fondap de Investigación en Dinámica de Altas Latitudes (IDEAL)

e-mail: pirjo.huovinen@uach.cl

LA CRIÓSFERA Y SU IMPORTANCIA

Una parte importante de nuestro planeta se encuentra congelada de forma permanente o temporal. En esta parte, denominada criósfera, se incluye tanto a sistemas acuáticos como terrestres los cuales pueden estar cubiertos de hielo o nieve, a los glaciares, las plataformas de hielo, los icebergs, y el permafrost. En las zonas polares la cubierta congelada es más permanente, mientras en otras regiones, la cobertura de hielo y nieve es más bien estacional o está confinada en la alta montaña.

La criósfera tiene un rol crucial en la regulación del clima global. La nieve blanca por su elevado albedo (alrededor de 90%) refleja gran parte de la radiación solar incidente hacia el espacio, atenuando el calentamiento del planeta. Por lo tanto, una disminución de las zonas dominadas por la criósfera contribuirá sustantivamente al aumento de la temperatura.

El derretimiento masivo de las capas de hielo observado en los últimos años en el Ártico, que supera las tasas pronosticadas por diferentes modelos, ha sido vinculado a un fenómeno denominado “nieve oscura” (Tedesco et al. 2016). Este oscurecimiento de la nieve es debido a impurezas (ej. black carbon, polvo) y microalgas que absorben la radiación solar, lo cual puede acelerar el derretimiento de la nieve y hielo vía reducción del albedo (a un valor de 30-45 % en la zona de la Península Antártica; Huovinen et al. 2018) (Figura 1).

La Antártica, llamada comúnmente el “continente blanco”, se encuentra en un 98 % cubierta de hielo, lo que representa alrededor del 90 % de todo el hielo del planeta. Por lo tanto, junto con el hielo marino y las plataformas de hielo que lo rodean, la criósfera antártica desempeña un papel fundamental en el clima global. En las últimas décadas, se han reportado cambios en los procesos climáticos, retroceso de glaciares y la reducción de la capa de hielo (revisado por Shepherd et al. 2018).

La Antártida Marítima, que incluye a la Península Antártica occidental, ha sido identificada como la región más afectada por el cambio

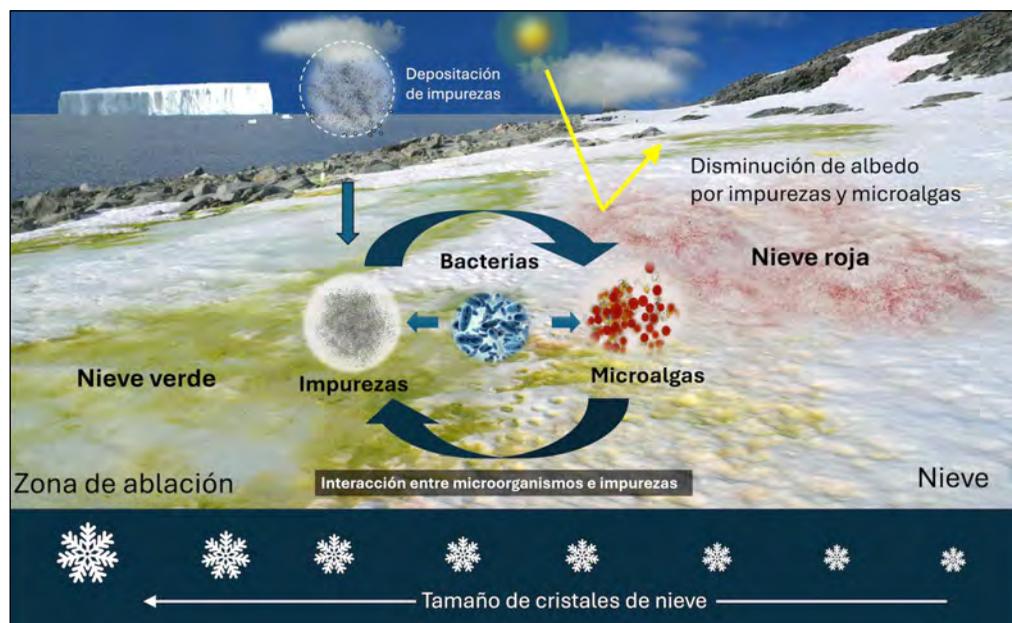


Figura 1: Representación esquemática de las microalgas de nieve e impurezas (ej. black carbon, polvo) y su rol en los procesos que aceleran el derretimiento de la nieve y reducción del albedo.



Figura 2: Floración verde de microalgas de nieve en la Isla Doumer, Península Antártica.

climático. A pesar de la evidencia, las tendencias generales de calentamiento, considerando la extensión de esta área y la variación en las condiciones climatológicas y oceanográficas naturales, indican que el cambio climático no afecta a toda el área de la misma manera. De hecho, se han reportado patrones contrastantes (calentamiento y enfriamiento) para diferentes regiones de la Antártica Marítima (Turner et al. 2020), destacando fuertes variaciones interanuales y estacionales. Estas evidencias ponen de manifiesto la necesidad de considerar las diferencias regionales al momento de evaluar el impacto del cambio climático en estos ecosistemas.

En la Antártica Marítima, la intensidad del deshielo estival se está acelerando, tomando en cuenta los últimos mil años (Abram et al. 2013) y se pronostica una expansión de hasta 25% de las áreas terrestres libres de hielo para finales de siglo (Lee et al. 2017). El derretimiento de los glaciares costeros podría generar nuevos hábitats, propicios para la colonización de especies locales, por ejemplo, macroalgas. Por otro lado, esto también podría abrir espacios para el establecimiento de especies invasoras.

AVANCES EN EL CONOCIMIENTO DE LAS MICROALGAS QUE HABITAN LA NIEVE

La nieve y el hielo son hábitats para diferentes microorganismos, incluyendo microalgas que forman floraciones de color visible. Las floraciones verdes están asociadas con la parte vegetativa del ciclo de vida de algunas especies las cuales tienen alto contenido de clorofila (Figura 2), mientras que la presencia de células enquistadas con alto contenido de carotenoides tiñe la superficie de la nieve de un color rojo intenso. Los eventos de florecimientos de estas microalgas pueden ser duraderos o transitorios. La nieve puede albergar temporalmente una variedad de microalgas, sin embargo, las especies que habitan exclusivamente la nieve, denominadas psicrófilas, pertenecen principalmente a algas verdes, por ejemplo, *Chlamydomonas*,

Chloromonas, *Sanguina* y *Chlorominima*. Estos organismos son considerados poli-extremófilos ya que su hábitat está expuesto a múltiples estresores abióticos, tales como baja temperatura, bajos niveles de nutrientes y alta radiación ultravioleta (UV).

Las algas de nieve juegan un rol clave en los ciclos biogeoquímicos y como productores primarios en las regiones que casi carecen de vegetación terrestre, como la Antártica. En los ecosistemas costeros de la Antártica la cercanía de colonias de animales (por ejemplo, aves y focas) proporciona ambientes ricos en nutrientes que estimulan la floración de las microalgas de nieve. Según Gray et al. (2020), la mayoría de las floraciones de algas de nieve en la Península Antártica occidental se encuentran en un radio de 5 km de las colonias de pingüinos. Pese a que Aristóteles ya conocía la existencia de este fenómeno, su origen se entendió recién a principios de siglo XIX, despertando mayor interés científico en la década de 1960. Desde entonces se ha avanzado mucho en el conocimiento de su morfología, fisiología y ecología. Recientemente, con el uso de herramientas moleculares de última generación se ha empezado a revelar la complejidad de interacciones que ocurren entre los diferentes tipos de microorganismos que habitan la nieve (Davey et al. 2019, Soto et al. 2023) (Figura 3).

Basado en el análisis morfológico de los quistes de resistencia, la especie causante de la nieve roja ha sido comúnmente clasificada como el alga verde *Chlamydomonas nivalis*. Esto llevó a una percepción que dicha especie dominaba este tipo de floraciones en diferentes partes del mundo. Esta concepción de una especie cosmopolita, ampliamente aceptada en el pasado, actualmente es cuestionada debido a evidencia creciente que indica que existe una alta diversidad en la composición de estas floraciones. Un ejemplo es *Chlorominima collina*, descrita recientemente en la Antártica Marítima (Gálvez et al. 2021), que aparentemente es una especie común en la nieve verde a lo largo de la Península Antártica. Por otra parte, los quistes rojos de algas de nieve que anteriormente habían sido asignados a la

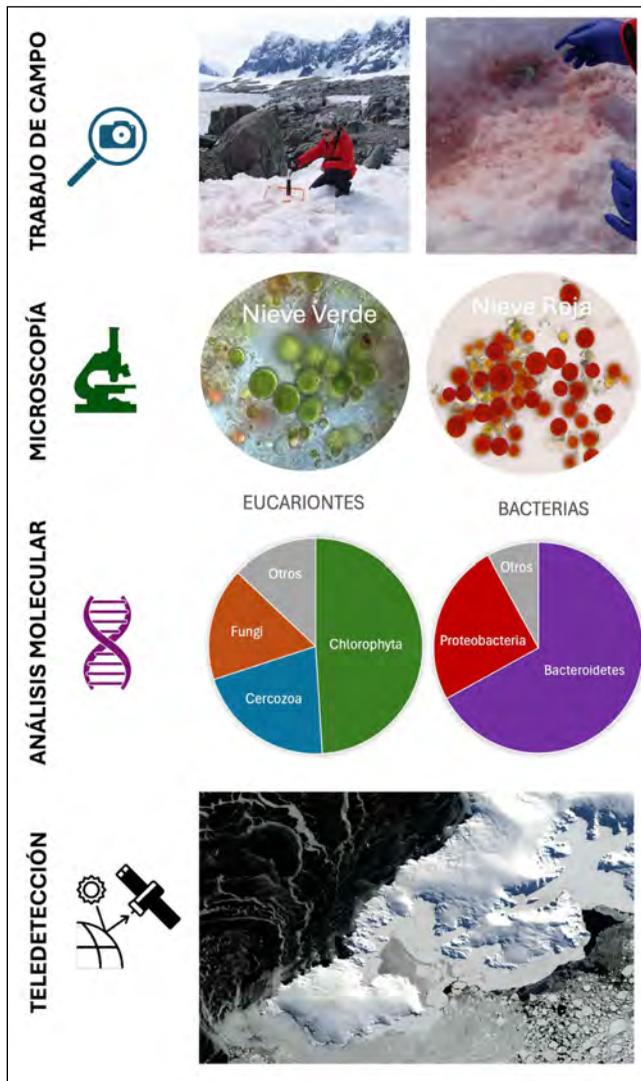


Figura 3: Aproximaciones en el estudio de microalgas de nieve en la Antártica Marítima, incluyendo observaciones *in situ* y mediante microscopía, análisis de la diversidad y funcionalidad a través de técnicas de secuenciación masiva hasta observaciones globales examinando imágenes satelitales. Presentación general de la abundancia relativa de bacteria y eucariontes en la nieve basada en Soto et al. (2022). Landsat-8 OLI image courtesy of the U.S. Geological Survey.

especie *Chlamydomonas nivalis* ahora corresponderían a una nueva entidad llamada *Sanguina*. En los campos de nieve las células móviles de color verde de estas especies son de corta duración ya que la formación de quistes rojos se activa rápidamente en función de señales ambientales tales como agotamiento de los nutrientes. Observaciones *in situ* han revelado una transición desde nieve blanca a verde y posteriormente a roja a lo largo de la temporada de crecimiento, lo que estaría acompañado de cambios en la composición de las especies

dominantes, lo que resulta también en una sucesión de comunidades microbianas, principalmente de bacterias (Soto et al. 2023). Sin embargo, las brechas en el conocimiento del ciclo de vida de muchas de estas especies de microalgas de nieve y su relación con los otros microorganismos que las acompañan, aun limitan nuestra comprensión de este fenómeno. En esta línea, el conocimiento de los patrones de dispersión (atmosférica o repositorio de quistes algales) ha sido identificado como un “tema candente”, básicamente porque la nieve roja de regiones polares es habitada por algas verdes tanto cosmopolitas como endémicas (Segawa et al. 2018).

MICROALGAS DE NIEVE - CENTINELAS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Los últimos avances en el conocimiento de nieve oscura ha abierto ha abierto nuevas direcciones para la investigación científica y obligado a una reevaluación de algunos aspectos que considerábamos como establecidos. Actualmente, nuestra comprensión de este fenómeno está cambiando, ya que su composición e interacciones son complejas y, además, porque están estrechamente relacionadas con las comunidades bacterianas.

A pesar de haber más información sobre la importancia de las floraciones algales en la nieve y hielo, y su rol en la reducción del albedo, nuestro entendimiento de los procesos que regulan este fenómeno aun es limitado. En los últimos años ha renacido el interés científico por las microalgas de nieve, especialmente en el contexto de su rol como aceleradores del derretimiento de la nieve y hielo. Se puede entonces considerar a las microalgas de nieve como actores clave (centinelas) en el estudio del cambio climático, ya que su proliferación acelera el derretimiento de la nieve, pero, por otro lado, se ven directamente afectadas por los cambios ambientales debido a la pérdida de su hábitat (Maréchal y Nedbalová 2022).

En este contexto, se podría esperar que el contenido de agua en la nieve aumente en la zona de ablación de los campos de nieve, proporcionando así condiciones adecuadas para la expansión de floraciones algales (Figura 1). Por otro lado, derretimiento acelerado eventualmente podría resultar en la pérdida del hábitat de nieve en áreas donde la formación de nieve no es muy abundante. Un estudio reciente sugiere que, si bien podría ocurrir una disminución de la mayoría de las floraciones algales en áreas pequeñas, por ejemplo, islas con baja elevación, la extensión y biomasa de algas de nieve debería aumentar a medida que la temperatura en la Península Antártica sube, debido a la expansión del área de floraciones algales en tierras más altas y amplias o en la cercanía de colonias de focas

NUEVAS APROXIMACIONES EN EL ESTUDIO DE MICROALGAS DE NIEVE

Para comprender mejor los cambios que ocurren en la criósfera Antártica, es fundamental abordar los cambios en el albedo de la nieve causados por las microalgas y otras partículas que absorben luz solar. En el marco del proyecto Fondecyt 1242028 ("*Future Antarctic cryosphere: Lost habitats or new opportunities for cold-adapted organisms?*") se busca estudiar los procesos relacionados con las floraciones de microalgas de nieve e impurezas a diferentes escalas espaciales y temporales, en el contexto del cambio climático que ocurre en la Antártida Marítima. Al relacionar la formación de floraciones tanto con las tendencias climáticas, como con las características y la fenología de la nieve y hielo en diferentes regiones (con tendencias potencialmente contrastantes de calentamiento o enfriamiento regional), se busca mejorar nuestra comprensión de la dinámica de estos fenómenos en futuros escenarios de cambio climático. El proyecto aborda estos temas emergentes con metodologías de vanguardia, que abarcan desde observaciones y mediciones *in situ* de los campos de nieve, examinación de las características biológicas de las microalgas mediante microscopía, análisis de la diversidad y funcionalidad de microorganismos a través de técnicas de secuenciación masiva hasta observaciones globales (sensores remotos) para describir la dinámica de las floraciones a escalas temporales y espaciales más amplias (Figura 3). La detección remota utilizando imágenes satelitales (Huovinen et al. 2018, Gray et al. 2020) está surgiendo como una nueva línea, abriendo oportunidades sin precedentes para el estudio de este fenómeno y su retroalimentación climática en regiones remotas e incluso inaccesibles.

CONSIDERACIONES FINALES

El conocimiento sobre la dinámica de las floraciones de microalgas en hábitat que están sufriendo rápida evolución adquiere creciente importancia en el contexto de su influencia sobre el albedo de la nieve y así el clima del planeta. Por otro lado, las tendencias regionales contrastantes y la fuerte variabilidad estacional e interanual de las condiciones climáticas en el área de la Península Antártica apuntan a la necesidad de una mejor comprensión de los patrones regionales. Debido a su localización estratégica, Chile puede llegar a representar un polo de desarrollo para el estudio de estos procesos que unen las ciencias del clima y la biología en un área del planeta, la Península Antártica, que esta siendo fuertemente impactada por el cambio climático.

FINANCIAMIENTO

Proyecto FONDECYT 1242028 y 1201053, Centro Fondap-IDEAL (Grant 15150003) ANID.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abram NJ, Mulvaney R, Wolff EW, Triest J, Kipfstuhl S (2013) Acceleration of snow melt in an Antarctic Peninsula ice core during the twentieth century. *Nat. Geosci.* 6: 404-411.
- Davey MP, Norman L, Sterk P, Huete-Ortega M, Bunbury F, et al. (2019) Snow algae communities in Antarctica: metabolic and taxonomic composition. *New Phytol.* 222: 1242-1255.
- Gálvez FE, Saldarriaga-Córdoba M, Huovinen P, Silva AX, Gómez I (2021) Revealing the characteristics of the Antarctic snow alga *Chloromonas collina* gen. et sp. nov. through taxonomy, physiology, and transcriptomics. *Front. Plant Sci.* 12: 662298.
- Gray A, Krolkowski M, Fretwell P, Convey P, Peck LS et al. (2020) Remote sensing reveals Antarctic green snow algae as important terrestrial carbon sink. *Nat. Commun.* 11: 2527.
- Huovinen P, Ramírez J, Gómez I (2018) Remote sensing of albedo-reducing snow algae and impurities in the Maritime Antarctica. *ISPRS J. Photogram. Remote Sens.* 146: 507-517.
- Lee JR, Raymond B, Bracegirdle TJ, Chadès I, Fuller RA et al (2017) Climate change drives expansion of Antarctic ice-free habitat. *Nature* 547: 49
- Maréchal E, Nedbalová L (2022) Editorial: Ice and Snow Algae. *Front. Plant Sci.* 13: 868467.
- Segawa T, Matsuzaki R, Takeuchi N, Akiyoshi A, Navarro F et al. (2018) Bipolar dispersal of red-snow algae. *Nat. Commun.* 9:3 094.
- Shepherd A, Fricker HA, Farrell SL (2018) Trends and connections across the Antarctic cryosphere. *Review. Nature* 558: 223-232.
- Soto DF, Franzetti A, Gómez I, Huovinen P (2022) Functional filtering and random processes affect the assembly of microbial communities of snow algae blooms at Maritime Antarctic. *Sci. Total Environ.* 805: 150305.
- Soto DF, Gómez I, Huovinen P (2023) Antarctic snow algae: unraveling the processes underlying microbial community assembly during blooms formation. *Microbiome* 11: 200.
- Tedesco M, Doherty S, Fettweis X, Alexander P, Jeyaratnam J, Stroeve J (2016) The darkening of the Greenland ice sheets: trends, drivers, and projections (1981–2100). *Cryosphere* 10: 477–496.
- Turner J, Marshall GJ, Clem K, Colwell S, Phillips T, Lu H (2020) Antarctic temperature variability and change from station data. *Int. J. Climatol.* 40: 2986–3007.

CENTRO FONDAP IDEAL

10 años investigando el Océano Austral



Iván Gómez^{1,2}

¹ Instituto de Ciencias Marinas y Limnológicas, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile, Valdivia

² Centro Fondap de Investigación en Dinámica de Altas Latitudes (IDEAL)

El Centro de Investigación Dinámica de Ecosistemas Marinos de Altas Latitudes se creó en 2015 en el marco del Fondo de Áreas Prioritarias que tenía por principal objetivo desarrollar ciencia de excelencia en la región Antártica y Subantártica. Estas dos regiones, estrechamente interconectadas por procesos oceanográficos y climáticos, son altamente vulnerables al cambio

climático y, por lo tanto, representan áreas de alto interés para la ciencia. Por ello, el Centro IDEAL desde un comienzo estuvo alineado con la agenda nacional e internacional sobre la crisis ambiental, específicamente, la generación de conocimiento científico acerca de la dinámica pasada, presente y futura de los ecosistemas marinos de la Patagonia y la Península Antártica.



Figura 1: Marco conceptual del centro IDEAL que integra temas transversales y procesos ecosistémicos de la zona sub-Antártica y la Península Antártica.

EL CENTRO IDEAL: UN PROYECTO INTEGRATIVO Y MULTIDISCIPLINARIO

El estudio del cambio climático ofrece grandes oportunidades para llevar a cabo un trabajo interdisciplinario en torno a un marco conceptual que necesariamente debe ser integrador: los múltiples factores impulsados por el clima a menudo no están linealmente correlacionados y además, en muchos casos, pueden ser el reflejo de efectos acumulativos en cascada. En esta línea, el Centro IDEAL definió a la investigación del clima y océanos, como altamente relacionada con las ciencias sociales. De esta forma se reconoció que la gestión y gobernanza integral, eficaz y equilibrada de los océanos requiere una comprensión empírica detallada no solo de los procesos biológicos, químicos y físicos, sino también de los procesos éticos y sociales, derivados tanto de la investigación básica como de la aplicada. Al fundir la dimensión natural con la humana, el Centro IDEAL se consolidó como un referente en la investigación sobre los procesos socio-ecológicos de los mares australes.

El centro fue organizado en cuatro Líneas de Investigación (RP):

- RP1: Procesos en un océano cambiante
- RP2: Bioinvasiones y endemismo en un mundo cambiante:
Un enfoque fisiológico y molecular
- RP3: Interacciones biológicas y modulación del bentos
- RP4: Dimensión humana de los sistemas socio-ecológicos marinos.

Tres temas transversales investigación definieron el marco conceptual del proyecto: i) Un océano cambiante; ii) Conectividad, bioinvasiones, movi­lidades y cambio de régimen; y iii) Vulnerabilidades socio-ecológicas y adaptación al cambio global (Figura 1). Para reforzar la colaboración entre las líneas de investigación y entregar información a los actores locales, se creó un “Equipo de Tarea”. Este grupo tenía como principal rol abordar preguntas e hipótesis interdisciplinarias y modelar procesos complejos, especialmente aquellos relacionados con múltiples impulsores del cambio global y sus efectos sobre los sistemas socio-ecológicos (por ejemplo, la pesca artesanal y acuicultura, migración y cambios en la composición laboral).

LA OBSERVACIÓN DEL OCÉANO AUSTRAL: DESAFÍOS Y AVANCES.

Las regiones sub-Antárticas y la Península Antártica son influenciadas por diferentes masas de agua oceánica, donde además los ecosistemas terrestres, fluviales y la criósfera aportan enormes cantidades de agua dulce. Por lo tanto, la observación del océano en esta región, considerada una de las más complejas, fue uno de los ejes centrales de nuestro proyecto.

Además de una activa participación en diversos cruceros oceanográficos nacionales e internacionales, que estudiaron las características físicas, químicas y biológicas de la región austral y Antártica a diferentes escalas espacio-temporales, el centro desplegó una serie de estaciones ubicadas en el Estrecho de Magallanes y fondeaderos equipados con sensores oceanográficos y trampas de sedimentos automatizada en el Canal Beagle e Isla Doumer, en la Península Antártica. Estas plataformas proporcionaron información sin precedentes sobre la variabilidad estacional e interanual de las condiciones oceanográficas y meteorológicas durante aproximadamente 8 años. A esto se sumó desde el año 2022 un sistema Ferry-Box, equipado con registradores de temperatura, salinidad, clorofila e hidrocarburos, el cual estuvo emplazado y operado desde el ferry Yaghan que realiza el trayecto entre Punta Arenas y Puerto Williams. Toda esta logística permitió mejorar la detección de cambios y anomalías en la columna de agua en una escala espacial y temporal sin precedentes para la región. Estos registros también son esenciales para modelar la dinámica de los organismos marinos bentónicos y pelágicos, y además permiten, por ejemplo, anticipar la aparición de floraciones de algas nocivas (FAN), o anomalías oceanográficas, como fue la detección de varias olas calor registradas por sensores someros instalados en la Isla Rey Jorge, Península Antártica (Figura 2). Considerando los enormes desafíos logísticos que implicó su operación en zonas remotas y climas extremos, la implementación de estas plataformas debe

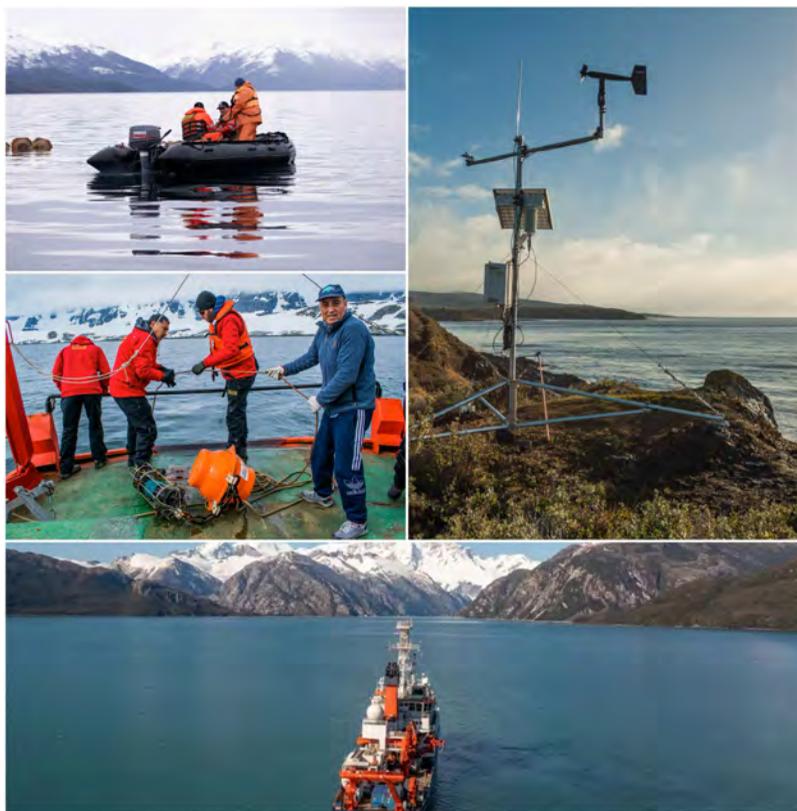


Figura 2: La observación de los procesos en un océano cambiante incluye la instalación de sistemas de monitoreo fijos y también la participación en cruceros oceanográficos. Muchos de estas actividades fueron realizadas en colaboración con instituciones nacionales y extranjeras.

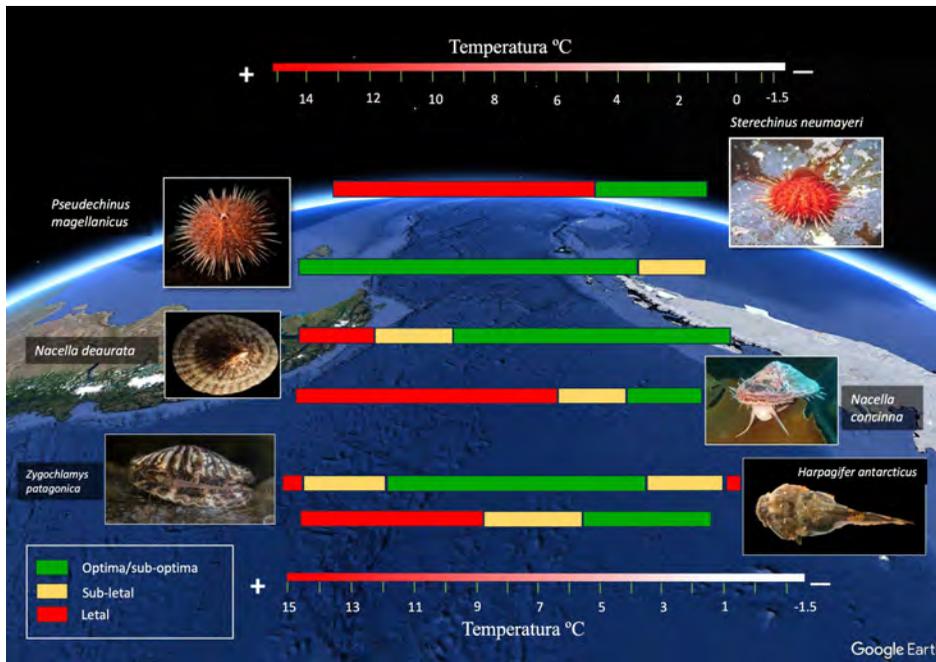


Figura 3: Rangos de tolerancia fisiológica de diversos organismos marinos de la Patagonia chilena y la Península Antártica. Los umbrales térmicos fueron determinados experimentalmente considerando diversos escenarios de calentamiento global, donde se definieron condiciones óptimas, subóptimas, subletales y letales.

considerarse un logro importante del centro, que permitió obtener información inédita y de alta resolución para una zona clave del planeta. Prevemos que este esfuerzo debe mantenerse y ampliarse a otros puntos, con el propósito de establecer una red de monitoreo funcional a la observación sostenida de los ambientes marinos que están experimentando los efectos del cambio climático.

EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA RECONFIGURACIÓN DE LOS UMBRALES FISIOLÓGICOS Y LA BIODIVERSIDAD EN LA ANTÁRTICA

Tras la formación del Paso de Drake y el establecimiento de la Corriente Circumpolar Antártica (CCA) hace más de 20 millones de años, los organismos de las regiones subantárticas y de la Antártica experimentaron procesos adaptativos y biogeográficos divergentes. En muchos aspectos, la CCA ha actuado como una barrera eficaz que aísla la biota de diferentes regiones. En el contexto del cambio climático y debido al rafting o al creciente tráfico marítimo, la Antártica es ahora más accesible para la colonización de organismos marinos provenientes de zonas más templadas lo que podría reorganizar la estructura y composición de la biodiversidad. La presencia cada vez más recurrente en algunas zonas de la Antártica de ejemplares de la macroalga *Durvillaea antarctica* o del chorrito *Mytilus chilensis* han abierto la discusión a acerca de la "porosidad" de la frontera natural que representa la CCA.

A través de estudios moleculares y fisiológicos, el centro IDEAL comparó rasgos fisiológicos relevantes (alimentación, metabolismo, potencial de crecimiento, supervivencia) de taxas relacionados que habitan la Patagonia austral y la Península Antártica. Estas investigaciones experimentales realizadas en diferentes tipos de invertebrados y peces revelaron los límites de tolerancia térmica que, en algunos casos, demuestran un potencial para sobrevivir en

la Antártida, dependiendo de los posibles escenarios climáticos. Por ejemplo, especies como el mejillón *Mytilus chilensis*, el erizo de mar *Pseudechinus magellanicus* o la almeja *Zygochlamys patagonica*, tendrían el potencial fisiológico para vivir a temperaturas cercanas a 2-4 °C, un rango de temperatura que podría darse en la Antártida en un futuro cercano. En el caso de algunas especies antárticas como el pez roca *Harpagifer antarcticus* o la lapa *Nacella concinna*, estas muestran rangos térmicos limitados que dificultarían mucho su existencia fuera de la Antártida o en escenarios de aumento extremo de temperatura (Figura 3).

ECOSISTEMAS COSTEROS ANTÁRTICOS: LA INTERCONEXIÓN ENTRE EL MUNDO MARINO Y LA CRIÓSFERA

Los ecosistemas costeros antárticos se caracterizan por comunidades únicas y altamente diversificadas, cuya estructura y función están amenazadas por el cambio global. Aunque muchos organismos bentónicos muestran adaptaciones fisiológicas para afrontar los cambios de temperatura, salinidad, radiación solar y perturbaciones tales como la escorrentía costera causada por el derretimiento de los campos de hielo, su capacidad para superar o al menos minimizar estos efectos, dependen en gran medida de diversas interacciones (positivas y negativas) que ocurren entre diferentes grupos de organismos.

En la Antártica, los sistemas costeros y sus procesos se ven directamente influenciados por la criósfera adyacente (glaciares, campos de nieve, cursos fluviales, etc.). El Centro IDEAL tuvo como uno de sus objetivos, estudiar las diferentes interacciones biológicas que ocurren más allá de la franja costera. Este enfoque incorpora la composición y funcionalidad molecular de los microorganismos que desempeñan un papel crucial en la configuración de ecosistemas

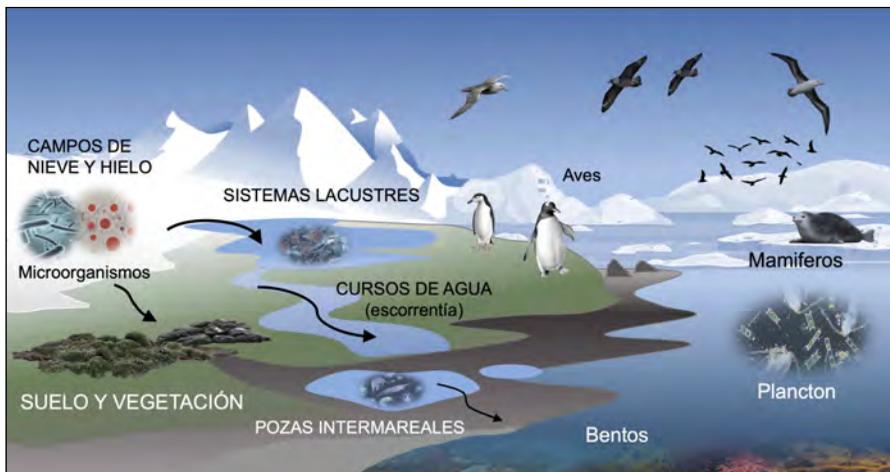


Figura 4: La interconexión de los ecosistemas marinos y los terrestres, incluyendo la criósfera y los sistemas de agua dulce es un rasgo distintivo de los ambientes costeros de la Antártica. Se indica los grupos de organismos que determinan los procesos biogeoquímicos y aquellos que se transportan entre la nieve, los lagos antárticos y las vías fluviales para llegar al mar.

terrestres y acuáticos, controlando flujos biogeoquímicos esenciales mediante conexiones tróficas, así como el intercambio de energía y nutrientes. Nuestros estudios demuestran que los sistemas de agua dulce asociados a lagos y campos de nieve desempeñan un papel fundamental en la conexión de ecosistemas distantes, facilitando la migración de algas y bacterias de la nieve a zonas marinas poco profundas y su posterior acumulación en sedimentos. Este intercambio está integrado dentro de los procesos biogeoquímicos del sistema costero antártico, donde también participan aves, mamíferos, el plancton y las comunidades bentónicas a través de tramas tróficas y utilización de nutrientes (Figura 4).

BOSQUES SUBMARINOS DE MACROALGAS: FUENTE DE BIODIVERSIDAD Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

Los bosques submarinos que forma la macroalga *Macrocystis pyrifera*, conocida también como Huiro, son ecosistemas en sí mismos y constituyen uno de los rasgos más característicos de los sistemas costeros de la región austral. Con una envergadura que puede superar los 50 m y una capacidad notable para colonizar diversos tipos de hábitats, esta especie es considerada la macroalga parda más ampliamente distribuida en el mundo. El centro IDEAL ha investigado la biología y ecología de estos bosques por casi 10 años, especialmente en la zona del Estrecho de Magallanes y el Canal de Beagle. Para la región sur austral la importancia de estos bosques radica en que cubren amplias extensiones de fiordos y canales, albergan una rica biodiversidad, donde destacan varias especies de

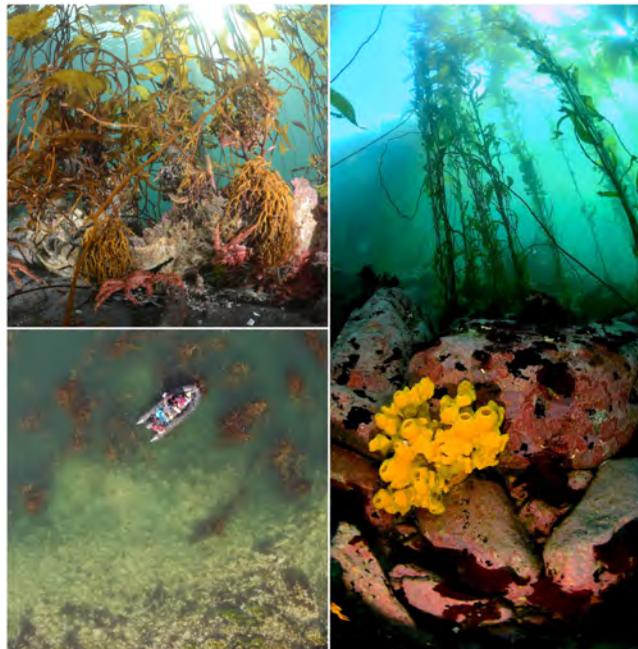


Figura 5: Los bosques submarinos de la especie *Macrocystis pyrifera* (Huiro) representan hotspots de biodiversidad, sustentan diferentes pesquerías artesanales y cubren grandes áreas que los convierten en importantes sumideros de CO₂.

invertebrados que sustentan diferentes pesquerías, tales como la centolla o el ostión patagónico (Figura 5).

Los estudios sobre sus adaptación morfo-funcional indican que la especie modifica su morfología y la asignación de biomasa entre disco basal, estipes y frondas para poder optimizar el uso de la luz y además resistir las perturbaciones causadas por las corrientes de marea. En el caso de las poblaciones del Sector Atlántico del Estrecho de Magallanes, estas muestran mayores requerimientos de luz, pese a vivir en ambientes turbios causado por variaciones de marea que pueden alcanzar 11 metros. Por el contrario, en la zona del Estrecho más cercana al Océano Pacífico, las algas permanecen siempre sumergidas y pueden habitar fondos a más de 20 metros de profundidad, por lo cual están adaptadas a fotosintetizar con menores niveles de luz. Estas adaptaciones también definen las características de la biota asociada. Por ejemplo, en zonas con alta

sedimentación y plataformas intermareales, dominan invertebrados suspensivos y detritívoros, mientras en bosques sumergidos, la mayor parte de los grupos funcionales esta representados por herbívoros y carnívoros. comunidades microbianas adyacentes también varían dependiendo del tipo de fronda donde se encuentran. En general los microbiomas del Huiro muestran una alta riqueza de especies, donde se distinguen algunos grupos centrales, por ejemplo, Enterobacterales, Flavobacteriales y Verrucomicrobiales.

Nuestras investigaciones han abierto nuevas líneas de trabajo. Una de ellas, la capacidad de esta especie para colonizar nuevas áreas que están quedando disponibles debido al retroceso de los glaciares

aledaños. Para ello, es necesario profundizar en el estudio de los microbiomas del fondo marino y también de los procesos biogeoquímicos asociado al derretimiento de las masas de hielo y su impacto en el sistema costero. Además, debido a su abundancia y cobertura, se ha abierto la interrogante acerca del potencial de esta especie de minimizar el calentamiento global, a través de la fijación y secuestro de carbono. Estas temáticas confirman la importancia de conservar este patrimonio natural de alto valor.

CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO REGIONAL Y NACIONAL

Durante estos diez años de funcionamiento, el Centro se ha convertido en un socio clave en la región de Magallanes, aportando información científica fundamental, sobre el funcionamiento del océano, por ejemplo, factores que exacerban las amenazas oceánicas (Floraciones Algales Nocivas, acidificación, calentamiento, bioinvasiones) y actividades humanas (acuicultura, pesca)] a diversos actores y tomadores de decisiones. La colaboración con otras instituciones nacionales como la Universidad de Magallanes (UMAG), el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP), el Instituto Antártico Chileno (INACH) e iniciativas financiadas por CORFO y ANID tales como el Consorcio Sur-SubAntártico Ci2030, Instituto Milenio BASE; Centro Basal COPAS-Sur Austral y Nodo Científico Austral Sur, potencia nuestra contribución a las políticas públicas. De especial importancia ha sido la implementación de la Serie Temporal de Datos Ambientales de la Región de Magallanes y la Península Antártica (<https://www.starm.cl>), desarrollada por Data Observatory, un consorcio público-privado entre Amazon Web Services (AWS) y la Universidad Adolfo Ibáñez (UAI). Esta plataforma pone a disposición de la comunidad nacional e internacional información proveniente de diversas fuentes y ubicaciones (instrumentos anclados, cruceros, estaciones meteorológicas y plataformas móviles, como FerryBox) en la Región de Magallanes y la Antártica.

Entre las principales contribuciones a las políticas públicas se encuentran: a) Índice de Salud del Océano (OHI)-Chile, basado en la premisa de que un océano saludable ofrece una serie de beneficios. El Índice evalúa diez parámetros cruciales, como la biodiversidad, la protección costera, el turismo y la recreación, los productos naturales, el suministro de alimentos de la pesca artesanal y la maricultura, y los medios de vida y las economías. La evaluación cubrió el espacio marino costero de 103 municipios costeros continentales de Chile, incluyendo aguas territoriales (es decir, dentro de las 12 millas náuticas) y aguas interiores. Considerando que estas regiones serán significativamente influenciadas por las tendencias actuales en el OHI, nuestros resultados sirven como un insumo para abordar las vulnerabilidades que enfrentan los municipios costeros de Chile y concebir estrategias efectivas para salvaguardar sus ecosistemas marino-costeros. b) Floraciones Algales Nocivas (FAN) y como ellas afectan el sistema socio-ecológico,

especialmente el cultivo de mitílicos y las interacciones de la pesca artesanal con eventos de FAN. Aquí, la escala de producción es un factor crucial para evaluar el impacto económico de las FAN en la acuicultura de mitílicos y asegurar su sostenibilidad. c) Acuicultura y su impacto en los sistemas socio-ecológicos. Estos estudios han entregado nuevos indicadores para medir los efectos de diferentes actividades humanas (por ejemplo, el cultivo de salmón y mitílicos) en los ecosistemas marinos del sur de Chile, no sólo en el contexto del cambio climático, sino también debido a una serie de transformaciones demográficas y cambios en la matriz productiva que están ocurriendo en esta vasta región subantártica.

LEGADO Y PROYECCIÓN

Durante estos años de funcionamiento, el Centro IDEAL ha logrado cumplir muchos de sus objetivos originales. Sin embargo, han surgido nuevas preguntas y desafíos. Estos se relacionan principalmente con la necesidad de abordar cuestiones relacionadas con la integración entre los estudios oceanográficos y climáticos, y la creciente necesidad de dar respuestas a los múltiples problemas socio-ecológicos, especialmente los asociados con el uso sostenible y la conservación de los recursos naturales marinos. Esto requiere una mayor colaboración entre la ciencia y los sectores público y privado, así como con los tomadores de decisiones. Sin embargo, también han surgido nuevas oportunidades, principalmente gracias a una red de colaboración internacional más sólida y, a nivel nacional, a la presencia de nuevos actores que enriquecen y mejoran la base científica de la región. Un aspecto muy importante es que el Centro IDEAL ha podido formar a nuevos investigadores a lo largo de los años, quienes, con más información y tecnología, deberían continuar el camino trazado por el centro. El haber podido conjugar las ciencias naturales y sociales en pos de resolver preguntas complejas en el ámbito de los sistemas socio-ecológicos también representa sin duda uno de nuestros más preciados legados.

AGRADECIMIENTOS

Como centro IDEAL queremos expresar el profundo agradecimiento a todos nuestros investigadores, asistentes de investigación, postdoctorantes, estudiantes de post y pre grado, así como al personal de apoyo administrativo que durante estos 10 años desplegaron todos sus talentos y capacidades en pos del logro de nuestras metas y objetivos.

FINANCIAMIENTO

Centro Fondap-IDEAL No 15150003, Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID)

OCEANOS, BIODIVERSIDAD, EXPLOTACIÓN Y MANEJO CON ENFOQUE ECOSISTÉMICO

Eleuterio Yáñez Rodríguez

Dr. en Oceanología Biológica
Profesor Titular PUCV
Socio SCHCM

eleuterio.yanez@pucv.cl
+56 995334243

LOS OCÉANOS

La salud de los océanos es fundamental para la vida en el planeta, dado los servicios indispensables que ellos nos proporcionan, tales como la producción de más del 50% del oxígeno que respiramos, la absorción de alrededor del 30% de las emisiones de CO₂, la producción de más del 50% del consumo de proteínas de los países más pobres, la producción de energías renovables (de vientos, mareas, corrientes), el control del clima a través de la circulación global oceánica y la gran biodiversidad que va desde especies microscópicas hasta las grandes ballenas, entre otros. Esta gran diversidad de especies se distribuye en hábitats favorables que constituyen ecosistemas que se relacionan entre sí. La gran dinámica de estos sistemas se ve favorecida por el funcionamiento de la interdependencia entre estos seres vivos, los cuales forman verdaderas cadenas tróficas con especies claves. Es así como se postula que a partir de la producción primaria se desarrolla la cadena trófica hacia arriba ("bottom up"), otra que indica que los predadores más grandes controlan su desarrollo hacia abajo ("top down") y una tercera que señala que los pequeños pelágicos controlan el sistema para arriba y para abajo ("wasp waist"). Estos sistemas biológicos tienden a un equilibrio estable; es decir, que funcionan alrededor de un "más menos" (los equilibrios perfectos son difíciles de encontrar) y que estos pueden pasar a un estado de transición (puntos fuera del equilibrio estable) por diversas perturbaciones. En la naturaleza todo sistema biológico tiene una producción, pero también pérdidas por mortalidades, donde la predación juega un importante rol. Hay que entender que esta dinámica se desarrolla en espacios limitados, que regulan de esta forma los crecimientos ilimitados, con ambientes cambiantes.

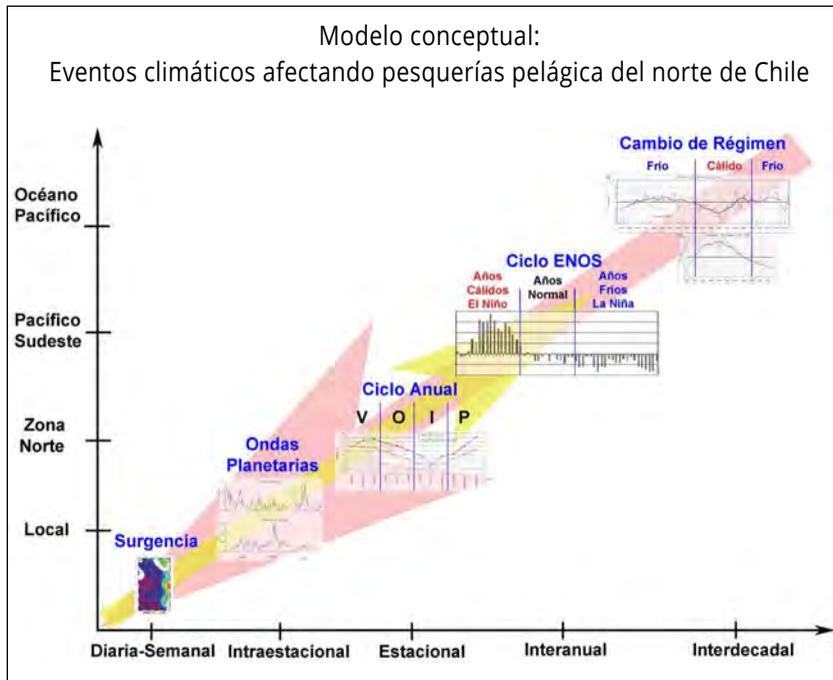
LAS PERTURBACIONES

En cuanto a las perturbaciones, está la variabilidad ambiental de alta frecuencia (como los ENSO) que afecta a menos del 40% de las especies clave y la variabilidad de baja frecuencia (interdecadal) que afecta al 80% de las especies claves (Liu et al. 2025). Un evento El Niño afecta la reproducción y los primeros estadios de la anchoveta, pero el stock adulto se protege profundizándose/migrando hasta que este pase, volviendo a la normalidad; un cambio interdecadal (fríos/cálidos/fríos) puede producir cambios de especies, pero cuando pasa este cambio se revierte la situación (es el caso de la anchoveta-sardina-anchoveta). El cambio climático producirá cambios en la distribución y abundancia de las especies, algunas de las cuales serán más afectadas (como los pequeños pelágicos) que otras (con más capacidad para desplazarse).

La contaminación es otra perturbación que se desarrolla a través de plásticos que se botan en el mar, algunos que enredan especies marinas y otros que se convierten en microplásticos consumidos por especies marinas, algunas de las cuales nosotros consumimos. Una de las mayores acumulaciones de plásticos está cerca de Rapanui - Isla de Pascua. Los químicos que se vierten en el mar y que afectan a las especies, como los provenientes de la agricultura, muchos de ellos difíciles de descomponer y algunos que producen des-oxigenación. La acústica que afecta a las especies y que es producida por la gran cantidad de embarcaciones/plataformas que esperamos pronto se implementen con motores eléctricos. La luminosidad artificial también afecta a las especies marinas. La biodiversidad no es homogénea en los océanos, existen al norte y al sur de los 30°, y lejos de la costa verdaderos desiertos oceánicos donde subsisten cantidades pequeñas de vida; cabe señalar que éstos han aumentado en los últimos años, lo cual está creando gran preocupación. Entonces, las mayores riquezas biológicas se encuentran cerca de las costas de los continentes, donde, por supuesto, la actividad pesquera se desarrolla con mayor énfasis.

Las pesquerías también actúan como perturbadores del funcionamiento de los ecosistemas al intentar, por lo general, capturar más de la capacidad productiva de las especies explotadas.

los modelos de toma de decisiones, con una gobernanza que implique el desarrollo de actividades sostenibles que favorezcan a la sociedad en su conjunto. No pensemos que esto sucederá de la noche a la mañana, puesto que esto será un proceso que tomará su tiempo. Pero, debemos acelerar el paso porque estamos atrasados si consideramos las distintas instancias de motivación que se han realizado para el logro de este fin (seminarios, simposios, proyectos nacionales específicos, proyectos GEF).



(Yáñez *et al.*, 2008a)

Entonces, cuando se sobre explota no solo se afecta al recurso objetivo, sino también a la cadena trófica del cual forma parte y por ende del funcionamiento del ecosistema, particularmente cuando se trata de especies claves. Por otra parte, las sobre explotaciones afectan severamente las actividades socio-económicas de inversionistas y comunidades costeras que viven de ellas. A pesar de los esfuerzos normativos por reducir los impactos negativos, el delicado equilibrio de los ecosistemas marinos se ha visto alterado por décadas de explotación de los mares, no obstante los avisos de los científicos y los esfuerzos de los encargados del manejo de los recursos hidrobiológicos. Chile no escapa de esta preocupante situación, lo cual se ha informado públicamente por parte de SUBPESCA y por diferentes investigadores a través de documentos formales y de difusión.

El cambio climático avanza con tendencia positiva y como perturbador de los ecosistemas, y por ende de las especies que permiten su funcionamiento. Pero debemos entender todavía cómo se harán efectivas esas perturbaciones, no obstante que se están desarrollando algunos avances (Yáñez *et al.*, 2018). Necesitamos entonces levantar la mirada de manera de no solo preocuparnos de las especies que se están explotando, sino también de las principales especies que interactúan con ellas, de la variabilidad climática, del cambio global (que incluye la pérdida de la biodiversidad, la contaminación y el cambio climático) y del efecto antrópico. Hay que cambiar entonces el paradigma y pasar a un manejo con enfoque ecosistémico, ampliando significativamente el horizonte de la investigación científica y de

CONSIDERACIONES SOBRE EL MANEJO CON ENFOQUE ECOSISTÉMICO (MEE)

La gestión sostenible de los recursos marinos está siendo objeto de un cambio de paradigma, evolucionando lentamente desde un manejo mono-específico a un MEE, para el logro de actividades que proporcionen fuentes de alimentos, empleos, rendimientos socio económicos y un buen estado del ambiente (Soto *et al.*, 2011; Defeo & Vasconcelos, 2020). Chile se comprometió con el MEE, así como con el enfoque precautorio, en su actual Ley de Pesca y Acuicultura. En consecuencia se

han organizado en estos últimos años eventos motivadores (nacionales e internacionales), particularmente por parte de la Sociedad Chilena de Ciencias del Mar (SCHCM) y el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP), entre otros, de los cuales recuperamos en esta oportunidad sugerencias/proposiciones que en forma muy sucinta se presentan a continuación.

El 23/05/2017 se realizó el Simposio “Investigación y manejo de recursos acuáticos con enfoque ecosistémico”, con las siguientes recomendaciones:

1. La investigación y el MEE de los recursos acuáticos es un proceso que está en progreso y debería consolidarse en el mediano plazo (10 años).
2. Es recomendable que la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (SUBPESCA) convoque un Comité Asesor para la implementar el MEE.
3. Implementar los principios que guían la acción en el ámbito del manejo operacional, las estrategias para la recuperación de las pesquerías y la producción sostenible de la acuicultura.
4. Implementar nuevos enfoques, favoreciendo un enfoque colaborativo, inter-institucional, inter-disciplinario y transparente.

El 18/05/2018 se desarrolló el Simposio Internacional “Enfoque Ecosistémico para el Manejo de Pesquerías en Chile en un contexto de Cambio Climático”; esbozándose las siguientes ideas centrales:

1. A pesar de los avances en las últimas décadas, implementar la práctica de este enfoque sigue siendo un desafío,

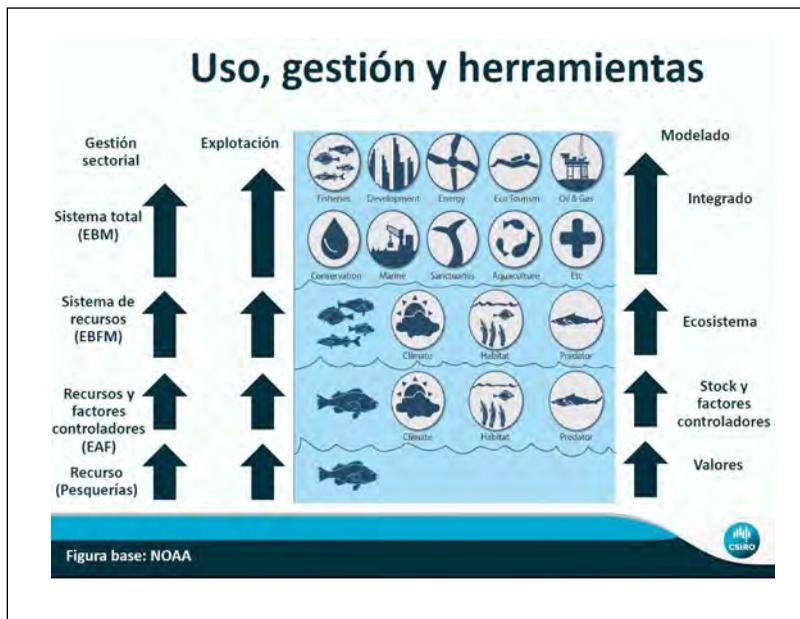
- especialmente en la combinación de políticas y disciplinas científicas necesarias para lograr una gestión efectiva.
- La pesca artesanal es diversa y enfrenta retos como el cambio climático y la llegada de nuevas pesquerías; se subrayó la necesidad de abordar los problemas a nivel regional bajo el MEE.
 - El MEE aún no está suficientemente integrado en la agenda pública.
 - El MEE en la gestión pesquera se ha demostrado en casos como el de Estados Unidos, donde la pesca sostenible es obligatoria.
 - La industria pesquera ha mejorado la selectividad de las artes de pesca y de las operaciones de pesca, disminuyendo el impacto sobre los fondos marinos y el ecosistema, avances reconocidos a través de la certificación MSC.
 - Es urgente adoptar el MEE en la gestión pesquera en Chile, para conservar los ecosistemas marinos y asegurar la viabilidad a largo plazo de las comunidades pesqueras y sus modos de vida.

El 18/05/2018 se realizó el Simposio “Impacto del Cambio Climático sobre las Pesquerías y la Acuicultura en Chile”, deduciéndose lo siguiente:

- Si se mantiene la tendencia que muestran los forzantes del cambio climático, cabe esperar que en los ecosistemas marinos se presenten cambios en las comunidades e ineludiblemente habrá especies “ganadoras” y “perdedoras”.
- La pregunta clave no es si la vida oceánica en su totalidad puede migrar, adaptarse y/o evolucionar, sino cuál será su capacidad para responder a los cambios, de tal manera que las “nuevas” comunidades proporcionen bienes y servicios esenciales.
- Los procesos de migración pueden ser difíciles para algunas especies, en tanto que otras podrían desplazarse a nuevos lugares donde desarrollarse, lo cual no es tan evidente.
- El uso de escenarios pareciera que tendrían respuestas especie-específica y altamente dependientes del grado de exposición a la variabilidad ambiental.
- La diversidad en la respuesta entre poblaciones revela el papel potencial de la adaptación local y/o la plasticidad fenotípica adaptativa en el aumento de la resistencia de las especies al cambio ambiental.
- Para enfrentar la incertidumbre se deben desarrollar estrategias de adaptación, con mecanismos que fortalezcan la resiliencia, profundizando en las dimensiones ecológicas y sociales del cambio climático
- Además se acordó proyectar la investigación científica; mejorar los pronósticos; proyectar la formación; dimensionar los riesgos y las adaptaciones; y realizar eventos internacionales sobre cambio climático, pesca y acuicultura.

El 1-3/12/2020 se realizó (vía remota) el “Seminario Internacional: Manejo de recursos acuáticos con enfoque ecosistémico: avances, brechas y perspectivas”, registrándose los siguientes planteamientos, que en forma más amplia se presentan en el Informe Final del Seminario (Yáñez et al, 2022):

- El MEE exige un enorme esfuerzo y cooperación entre científicos, pescadores, ambientalistas y autoridades (gobernanza).
- Queda bastante por avanzar en MEE, particularmente en la investigación integradora, incorporando variables ambientales, sociales y económicas.
- Un avance en Chile es la creación de los Comités Científico-Técnico y de Manejo, y de los Consejos Zonales y Nacional de Pesca y Acuicultura, que deben cambiar la visión mono-específica al de MEE.
- Es necesaria la formación de un grupo inter-disciplinario que analice la situación y proponga un camino para avanzar con celeridad en el tema del MEE. Por su parte, la institucionalidad debiera precisar el significado del MEE y la forma de promocionarlo, así como definir una política pesquera que persiga claros objetivos.
- El Fondo de Investigación Pesquera y de Acuicultura (FIPA) debe ser administrado por especialistas debidamente calificados y pasar a financiar programas de investigación, considerando todas las especies explotadas.
- La acuicultura en Chile enfrenta brechas y desafíos en el plano productivo, ambiental, económico y social. Esto requiere de la generación de conocimiento científico con una perspectiva transdisciplinaria, de tal manera de lograr una aproximación integral de la realidad natural, social y económica.
- Los fiordos son áreas complejas, con estudios de dinámica y procesos ecológicos escasos y parciales.
- Para transitar de manera concreta hacia el MEE en acuicultura se debe avanzar en investigación e innovación tecnológica, productiva e institucional. Se debe determinar cuanta materia y energía ingresa al ecosistema, y cuanta sale por acción de la acuicultura. Se debe transitar hacia cultivos integrados multitrofos para hacer uso de los nutrientes de diversos orígenes.
- No se conoce el impacto de la acuicultura en poblaciones de recursos pesqueros y otras especies del ecosistema de canales y fiordos del sur de Chile. Uno de los desafíos fundamentales es recuperar de manera efectiva los ecosistemas impactados por la acuicultura. Si bien se ha fortalecido la investigación, para avanzar en ciencia es muy importante la libertad para elegir los temas de investigación, porque la toma de decisiones y la ciencia no siempre caminan juntas.
- Para aplicar el MEE se deben considerar otras actividades antropogénicas, como la agricultura, la minería, los vertimientos de agua, además de la variabilidad ambiental y diferentes escenarios del cambio climático que podrían impactar la resiliencia de los ecosistemas. Debe modificarse el modo de ocupar los espacios, las especies hidrobiológicas y el uso del ambiente. La dicotomía entre lo social y lo ecológico no es aceptable, ya que todos somos parte del ecosistema. En consecuencia, debe aplicarse un enfoque que permita asumir los costos de ocupar los recursos de la naturaleza, determinar las externalidades de la acuicultura y no diezmar las poblaciones de especies hidrobiológicas.
- La institucionalidad cumple un rol importante en la articulación de los actores y componentes del sistema.



11. Se ha mostrado que hay elementos para avanzar hacia el MEE, que existe un logro sustantivo en el conocimiento en los últimos decenios y que la ciencia debe ser considerada esencial en la administración de la acuicultura y la pesca. Por lo pronto se deben determinar cuáles son las brechas ecológicas, sociales, productivas y normativas, para avanzar en la toma de decisiones y lograr que la acuicultura y la pesca sean sostenibles en el tiempo.
12. Se reconoce que se está interviniendo el ecosistema, a diferentes niveles, produciendo diversos efectos. Se necesita entonces información e investigación para conocer los impactos en el ecosistema, establecer e implementar políticas públicas que permitan sostener la producción y reducir los efectos abordando los problemas ambientales y desarrollando tecnología para favorecer la mitigación.

El 12-14/11/2024 se realizó el "II Seminario Internacional sobre Manejo de la pesca y la acuicultura con enfoque ecosistémico en tiempos de cambio climático: Avances, desafíos y acciones", cuyas recomendaciones de políticas públicas todavía se encuentran en elaboración.

Finalmente cabe señalar, que la Agenda 2030 de las Naciones Unidas (2018), a través de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), establece una hoja de ruta para abordar los desafíos ambientales, sociales y económicos a nivel global. En este contexto, el MEE es visto como una herramienta clave para operacionalizar estos objetivos, especialmente en áreas relacionadas con la conservación y el uso sostenible de los océanos (ODS 14) y la acción climática (ODS 13). Este enfoque integral permite abordar las interdependencias entre la biodiversidad, los recursos naturales y las comunidades, buscando una gestión equilibrada que tome en cuenta tanto la conservación como el desarrollo.

REFERENCIAS

Defeo, O. & Vasconcellos, M. 2020. Transición hacia un enfoque ecosistémico de la pesca - Lecciones aprendidas de pesquerías de América del Sur. FAO Documento técnico de pesca y acuicultura N.º 668. Roma, FAO.

<https://doi.org/10.4060/cb2229es>

Liu, Y., Luo, L., Feng, Y. et al. 2020. Impact of climate change on global catches of marine fisheries from 1971 to 2020. *J. Ocean. Limnol.* (2025). <https://doi.org/10.1007/s00343-024-4064-2>

Naciones Unidas. 2018. La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago.

Soto et al. 2011. Desarrollo de la acuicultura. 4. Enfoque ecosistémico a la acuicultura. FAO Orientaciones Técnicas para la Pesca Responsable. No. 5, Supl. 4. Roma, FAO, 60 p.

Yañez, E., C. Lang, M.Á. Barbieri, C. Montenegro & C. 2022. Informe del Seminario Internacional: "Manejo de Recursos Acuáticos con Enfoque Ecosistémico: Avances, Brechas y Perspectivas". International workshop report: "Ecosystem approach to management of aquatic resources: progress, gaps and perspectives". Sociedad Chilena de Ciencias del Mar e Instituto de Fomento Pesquero, Chile. Ediciones del Instituto de Fomento Pesquero, Valparaíso, Chile, 52 pp.

Yañez, E., N. Lagos, R. Norambuena, C. Silva, J. Letelier, K. P. Muck, G. San Martín, S. Benítez, B. Broitman, H. Contreras, C. Duarte, S. Gelcich, F. A. Labra, M. Lardies, P. Manríquez, P. Quijón, L. Ramajo, E. González, R. Molina, A. Gómez, L. Soto, A. Montecino, M. Á. Barbieri, F. Plaza, F. Sánchez, A. Aranís, C. Bernal & G. Böhm. 2018. Impacts of Climate Change on Marine Fisheries and Aquaculture in Chile (Chapter 10). In: Phillips F. Bruce & Mónica Pérez-Ramírez (Editores). *Climate Change Impacts on Fisheries and Aquaculture: A Global Analysis*. Editorial Wiley, Volume 1, Chapter 10, pp. 239-332.

PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE FOTOLIASA, ENZIMA ALGAL REPARADORA DE ADN, PARA PRODUCTOS COSMÉTICOS

SUSTAINABLE PRODUCTION OF PHOTOLYASE, A DNA REPAIR ALGAL ENZYME, FOR COSMETIC PRODUCTS



Alejandro Vallejos Almira^{1,2}, Andrea Donoso^{1,2}, Cristian Agurto Muñoz^{1,2}

¹ Departamento de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Facultad de Farmacia, Universidad de Concepción, Concepción, Región del Bío Bío, Chile

² Grupo Interdisciplinario de Biotecnología Marina GIBMAR del Centro de Biotecnología, Universidad de Concepción, Concepción, Región del Bío Bío, Chile

La radiación UV (R-UV) genera una serie de efectos perjudiciales en la piel, siendo el daño en el ADN uno de los más nocivos por la formación de fotoproductos. Los humanos poseen estrategias moleculares para reducir estos fotoproductos, sin embargo, estos se acumulan en el tiempo y tras excesivas exposiciones a la radiación solar causa en las personas fotoenvejecimiento y cáncer de piel. En este contexto, el mercado de productos cosméticos naturales ha tenido un constante crecimiento a nivel mundial y, especialmente, orientado a revertir estos daños en la piel, siendo la proteína fotoliasa uno de los principios activos más eficientes.

Fotoliasa, se produce naturalmente en bacterias, hongos, algas, plantas y algunos animales, pero no se encuentra presente en humanos, por lo que, ha sido incorporada bajo distintas formulaciones a protectores solares y cremas dermatológicas (Figura 1). A modo general, fotoliasa es una enzima que utiliza

Ultraviolet radiation (UVR) causes a range of harmful effects on the skin, with DNA damage being among the most severe due to the formation of photoproducts. Humans possess molecular strategies to reduce these photoproducts; however, they accumulate over time, and excessive exposure to solar radiation leads to photoaging and skin cancer. In this context, the global market for natural cosmetic products has seen steady growth, particularly focused on reversing such skin damage, with photolyase protein being one of the most effective active ingredients.

Photolyase is naturally produced in bacteria, fungi, algae, plants, and some animals, but it is not present in humans. For this reason, it has been incorporated into various formulations of sunscreens and dermatological creams (Figure 1). Briefly, photolyase is an enzyme that uses visible light energy (especially blue light) to directly reverse photoproducts generated by UVR in DNA. To do

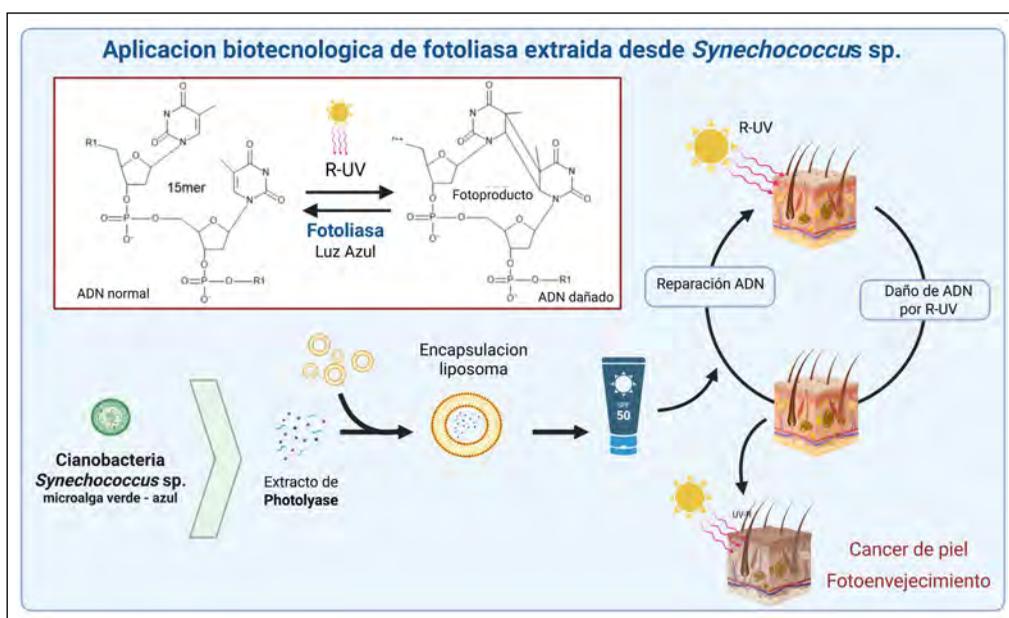


Figura 1: Aplicación en cosméticos de fotoliasa producida en *Synechococcus* sp. mediante su encapsulación para prevención de daño solar la piel.

Figure 1: Application in cosmetics of photolyase produced in *Synechococcus* sp. through its encapsulation for the prevention of sun damage to the skin.

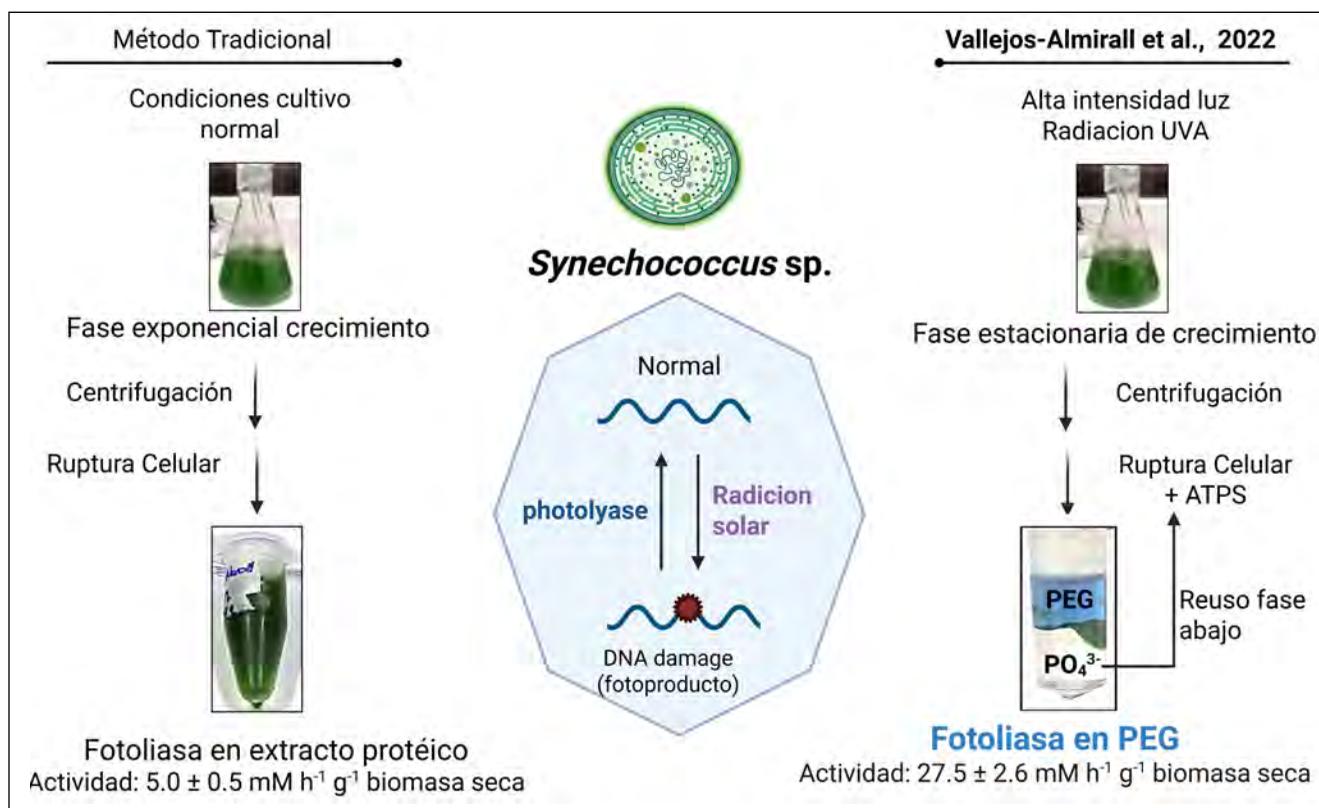


Figura 2: Resumen de los principales resultados obtenidos en el aumento de producción de fotoliasa en *Synechococcus sp.* (adaptado de Vallejos-Almirall et. al, 2022)

Figure 2: Summary of the main results obtained in the increase of photolyase production in *Synechococcus sp.* (extracted from Vallejos-Almirall et. al, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s10811-022-02808-w>)

energía de la luz visible (especialmente luz azul) para revertir directamente los fotoproductos generados por R-UV en ADN. Para ello, fotoliasa reconoce el fotoproducto en el ADN, se une, restaura el fotoproducto en presencia de luz azul, y se suelta del ADN, siendo este mecanismo conocido como fotoreactivación. Actualmente, en el mercado existen una serie de productos dérmicos (cremas y lociones) que contienen fotoliasa, enfocados en la disminución del fotoenvejecimiento y la prevención de cáncer de piel debido a exposiciones prolongadas y constantes a la radiación solar por parte de las personas.

Entre las principales fuentes naturales de fotoliasa, se destaca la cianobacteria *Synechococcus sp.*, a partir de la cual se extrae esta enzima a nivel comercial. Sin embargo, siguen existiendo brechas en torno a su productividad y la viabilidad económica de esta fuente natural de fotoliasa. Dado que fotoliasa es una proteína de alto valor comercial en esta industria y con una alta demanda a nivel mundial, es que como grupo de investigación abordamos distintas estrategias para aumentar su producción en *Synechococcus sp.* y en otras especies microalgas de alto valor comercial, con especial énfasis en el mercado de los cosméticos naturales sustentables. Los desarrollos que se han logrado en esta área han sido posibles gracias a los distintos financiamientos del Gobierno de Chile, gestionados y administrados por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID, Chile), mediante sus diversos instrumentos, tanto de ciencia básica como aplicada.

so, photolyase recognizes the photoproduct in the DNA, binds to it, repairs the damage in the presence of blue light, and then detaches from the DNA – a mechanism known as photoreactivation. Currently, a variety of skin care products (creams and lotions) containing photolyase are available on the market, aimed at reducing photoaging and preventing skin cancer caused by prolonged and repeated exposure to solar radiation.

Among the main natural sources of photolyase, the cyanobacterium *Synechococcus sp.* stands out, from which this enzyme is commercially extracted. However, there are still gaps regarding its productivity and the economic viability of this natural source of photolyase. Since photolyase is a high-value protein in this industry with strong global demand, our research group is exploring various strategies to increase its production in *Synechococcus sp.* and in other commercially valuable microalgae species, with a particular focus on the sustainable natural cosmetics market. The advancements achieved in this field have been made possible thanks to funding from the Government of Chile, managed and administered by the National Agency for Research and Development (ANID, Chile), through its various instruments supporting both basic and applied science

DESDE LA CIENCIA BÁSICA A LA APLICADA

El estudio de producción de fotoliasa surge con la Tesis Doctoral del Dr. Alejandro Vallejos (Doctorado en Ciencias y Tecnología Analíticas), ejecutada en la Facultad de Farmacia de la Universidad de Concepción. Si bien este proyecto doctoral se enfocó en el desarrollo de ciencia básica, se logró desarrollar un bioproceso de producción de fotoliasa en la cianobacteria *Synechococcus* sp. (microalga verde-azul), llevando esta investigación al área de ciencia aplicada y biotecnológica. Este bioproceso aumentó la producción de fotoliasa en 5 veces mediante el aumento de la intensidad de luz blanca durante el cultivo y su extracción por un método novedoso denominado Extracción en Dos Fases Acuosas (Figura 2).

Si bien *Synechococcus* sp. es la principal microalga a partir de la cual se extrae fotoliasa, existen una serie de otras potenciales microalgas que pueden considerarse como nuevas fuentes naturales de fotoliasa y que se producen a nivel industrial en diversos países y en Chile. Por esta razón, la línea de investigación de producción de fotoliasa en microalgas prosiguió con el proyecto de FONDECYT de postdoctorado del Dr. Vallejos "Evaluación de la producción de fotoliasa, para su uso en productos cosméticos, desde las microalgas *D. salina* y *H. pluvialis* durante el bioproceso de producción de compuestos β -carotenos y astaxantina". En esta ocasión, el proyecto tuvo como principal objetivo demostrar la factibilidad de producir fotoliasa y carotenos en dos microalgas que son altamente productivas a nivel industrial y mundial, a diferencia de *Synechococcus* sp. Este proyecto permitió diversificar las fuentes de obtención de fotoliasa, siendo *D. salina* la que presentó la mayor producción de esta enzima reparadora de ADN mediante un proceso de cultivo inductivo con luz azul. Para este proyecto, se contó también con la colaboración de importantes investigadores de la Universidad de Almería (Almería, España), Dr. Juan Gallardo, quien es especialista en desarrollo y optimización de cultivos de microalgas marinas, cumpliéndose un importante hito como grupo al desarrollar este bioproceso y establecer colaboraciones internacionales. En la figura 3, se presenta un resumen de los principales resultados del proyecto postdoctoral.

FROM FUNDAMENTAL TO APPLIED SCIENCE

The study on photolyase production originated from the Doctoral Thesis of Dr. Alejandro Vallejos (Ph.D. in Analytical Sciences and Technology), conducted at the Faculty of Pharmacy of the University of Concepción. Although this doctoral project focused on basic science, it successfully led to the development of a bioprocess for photolyase production in the cyanobacterium *Synechococcus* sp. (a blue-green microalga), advancing the research into the field of applied science and biotechnology. This bioprocess increased photolyase production fivefold by enhancing white light intensity during cultivation and using a novel method known as Aqueous Two-Phase Extraction (Figure 2).

Although *Synechococcus* sp. is the main microalga from which photolyase is extracted, several other potential microalgae may serve as new natural sources of photolyase and are already being produced at an industrial scale in various countries, including Chile. For this reason, the research line on photolyase production in microalgae continued with Dr. Vallejos' FONDECYT postdoctoral project titled "Evaluation of photolyase production for use in cosmetic products from the microalgae *D. salina* and *H. pluvialis* during the bioprocess for β -carotene and astaxanthin production." This project aimed primarily to demonstrate the feasibility of producing both photolyase and carotenoids in two microalgae species that are highly productive at the industrial and global level, unlike *Synechococcus* sp. The project enabled diversification of photolyase sources, with *D. salina* showing the highest production of this DNA-repairing enzyme through an inductive cultivation process using blue light.

This project also included collaboration with prominent researchers from the University of Almería (Almería, Spain), particularly

Dr. Juan Gallardo, an expert in the development and optimization of marine microalgae cultivation—marking a significant milestone for the research group in developing this bioprocess and establishing international collaborations. Figure 3 presents a summary of the main results of the postdoctoral project.



Figura 3: Resumen de los resultados obtenidos durante el proyecto postdoctoral FONDECYT-ANID (N°3210523).

Figure 3: Summary of the results obtained during postdoctoral FONDECYT-ANID project (N°3210523).

Los dos proyectos anteriores, doctoral y postdoctoral, tenían un componente de desarrollo tecnológico importante y un alto potencial de aplicabilidad a nivel industrial, motivo por el cual se planteó incorporar a agentes empresariales dedicados a la producción de microalgas y cosmética para proyectar estos desarrollos biotecnológicos a la industria, previa validación a escala piloto de la tecnología. Es así como surge el proyecto FONDEF IDeA “CYANOREPAIR: Desarrollo de un bioproceso de cultivo inductivo para la obtención de una enzima reparadora de ADN a partir de la cianobacteria *Arthrospira* spp. para el mercado de los cosmeceúticos”, donde participan las empresas Bioproductos Nutritivos, productora de microalgas y de productos derivados de alto valor alimentario con gran enfoque en la innovación; y el Laboratorio Ximena Polanco, dedicado al desarrollo, producción e innovación de cosméticos naturales.

Este proyecto tiene como principal objetivo la producción de fotoliasa mediante un bioproceso de cultivo inductivo (Figura 4) y evaluación de su funcionalidad en modelos celulares de piel. Para este proyecto, se propuso a la microalga verde-azul *Spirulina* (*Arthrospira maxima*) como una nueva fuente de fotoliasa y una alternativa sustentable de mayor producción a nivel industrial en comparación con la actual fuente de fotoliasa, la microalga verde-azul *Synechococcus* sp. La última etapa de este proyecto es crucial, ya que contempla la validación a escala piloto (200 L) y, principalmente, los mecanismos para transferir la tecnología a la industria, siendo estos los que darán un impacto real en el desarrollo tecnológico, ya que tendrán un impacto social y de generación de nuevos puestos de trabajo asociados a esta nueva tecnología.

The previous doctoral and postdoctoral projects had a significant technological development component and strong potential for industrial application. For this reason, the integration of business partners involved in microalgae and cosmetic production was proposed to help transfer these biotechnological advances to industry, following pilot-scale validation of the technology. This led to the FONDEF IDeA project “CYANOREPAIR: Development of an inductive cultivation bioprocess for the production of a DNA-repairing enzyme from the cyanobacterium *Arthrospira* spp. for the cosmeceutical market,” with the participation of Bioproductos Nutritivos—a company focused on the production of microalgae and high-value food products with a strong emphasis on innovation—and Ximena Polanco Laboratory, which specializes in the development, production, and innovation of natural cosmetics.

The main objective of this project is the production of photoliasa through an inductive cultivation bioprocess (Figure 4) and the evaluation of its functionality in skin cell models. For this project, the blue-green microalga *Spirulina* (*Arthrospira maxima*) was proposed as a new source of photoliasa and a more sustainable and higher-yielding alternative for industrial-scale production compared to the current source, *Synechococcus* sp. The final stage of this project is critical, as it includes pilot-scale validation (200 L) and, most importantly, the development of mechanisms to transfer technology to industry. This step is expected to generate real technological impact, along with social benefits and the creation of new jobs associated with the implementation of this innovative technology.

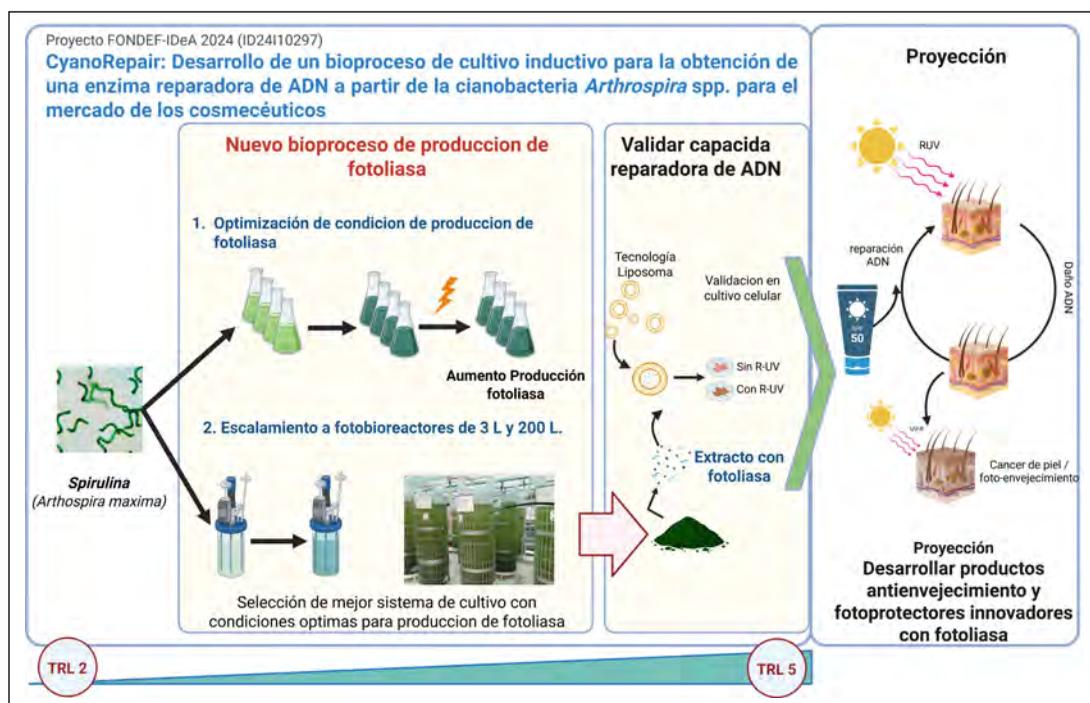


Figura 4: Resumen de propuesta correspondiente al Proyecto FONDEF-IdEA 2024 (ID24I10297).

Figure 4: Proposal summary for the FONDEF-IdEA 2024 Project (ID24I10297).

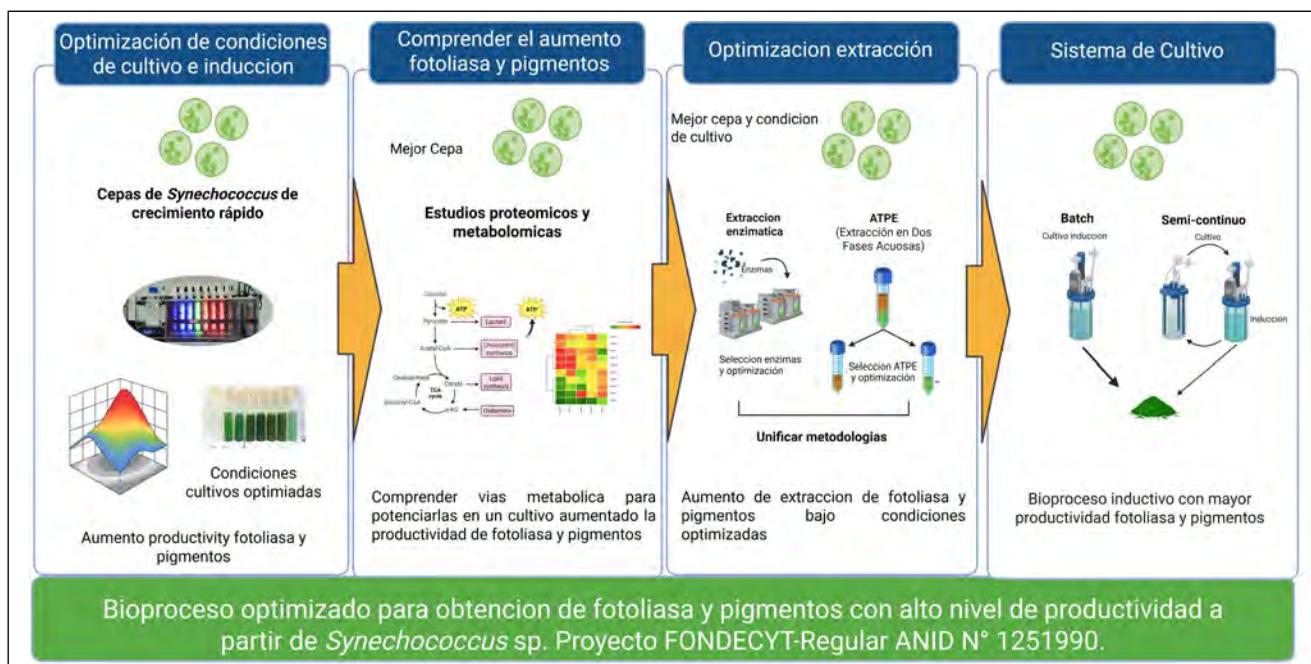


Figure 5: Resumen de propuesta correspondiente al Proyecto FONDECYT Regular – ANID 2025 (N°1251990).

Figure 5: Proposal summary corresponding to the FONDECYT Regular Project – ANID 2025 (N°. 1251990).

A pesar de la brecha biotecnológica existente en cuanto a la producción de fotoliasa que hemos planteado dar solución como equipo de investigadores, existe también una brecha a nivel de ciencia básica que se está abordando mediante un proyecto FONDECYT Regular adjudicado recientemente por el Dr. Vallejos (Figura 5). En este interesante proyecto, el foco está puesto en comprender cómo, a nivel molecular, el proceso de inducción de fotoliasa durante el crecimiento de *Synechococcus* spp., está incrementando la producción de fotoliasa y de otros pigmentos de alto valor comercial, como los carotenos (amarillo-naranja), clorofila (verde) y ficobiliproteínas (azul). Esto nos permitirá explicar y aplicar este conocimiento al desarrollo de nuevas estrategias de producción de fotoliasa y otros productos relevantes industrialmente. Además, el proyecto también aborda la optimización del cultivo y la extracción de multiproductos (fotoliasa y pigmentos) con un enfoque de máxima utilización de la biomasa, en lo que se conoce como biorrefinería.

Estos estudios sobre la producción de fotoliasa permitirán establecer o implementar en las empresas productoras de microalgas, tanto a nivel nacional como a nivel mundial, desarrollos biotecnológicos que son fácilmente adaptables en la cadena de cultivo de estas microalgas, aumentando así la cartera de productos de alto valor. Cabe destacar que la extracción de fotoliasa desde microalgas presenta una serie de ventajas respecto a otras fuentes naturales de fotoliasa como las plantas. Las principales ventajas son la independencia geográfica cuando son cultivadas en fotobioreactores, su rápido crecimiento, bajo impacto ambiental y su alta factibilidad de escalamiento.

Despite the existing biotechnological gap in photolyase production—which our research team is actively working to address—there is also a fundamental knowledge gap that is currently being tackled through a recently awarded FONDECYT Regular project led by Dr. Vallejos (Figure 5). This compelling project focuses on understanding, at the molecular level, how the induction process of photolyase during the growth of *Synechococcus* spp. enhances not only photolyase production but also the synthesis of other commercially valuable pigments such as carotenoids (yellow-orange), chlorophyll (green), and phycobiliproteins (blue). This knowledge will allow us to explain and apply these mechanisms to develop new strategies to produce photolyase and other industrially relevant products. Moreover, the project also addresses the optimization of cultivation and multiproduct extraction (photolyase and pigments) with a focus on maximum biomass utilization, following the principles of biorefinery.

These studies on photolyase production will enable the establishment or implementation of biotechnological developments in microalgae-producing companies, both nationally and internationally. These innovations can be easily integrated into the cultivation chain of these microalgae, thereby expanding their portfolio of high-value products. It is worth noting that extracting photolyases from microalgae offers several advantages over other natural sources such as plants. The main benefits include geographic independence when cultivated in photobioreactors, rapid growth, low environmental impact, and high scalability potential.

Although photolyases are currently available on the market in creams for dermatological treatments, particularly for anti-aging and skin cancer prevention—its sustainable production remains unresolved.

Si bien, actualmente en el mercado existe fotoliasa en cremas para tratamientos dermatológicos y, especialmente, para prevenir el antienvjecimiento y cáncer de piel, la producción sostenible de fotoliasa no se encuentra resuelta. Esta industria presenta baja productividad de fotoliasa debido a que se enfoca solo en producir biomasa de la microalga sin potenciar la acumulación de fotoliasa en esta, disminuyendo la viabilidad económica de esta fuente natural. En este sentido, los proyectos desarrollados y los que están en ejecución permitirán aumentar o inducir la producción de fotoliasa en estas microalgas. Además, será crucial contar con convenios de colaboración con las empresas productoras de microalgas y con empresas que desarrollan cosméticos para validar los bioprocesos a escala industrial. Con ello, será posible dar el paso de la Universidad a la Industria de nuestras tecnologías llegando, por lo tanto, al mercado nacional e internacional con productos desarrollados y producidos en Chile.

AGRADECIMIENTOS

Como grupo de investigación agradecemos principalmente a fuentes de financiamiento de ANID-Chile, especialmente, a Beca Doctoral ANID (N°21161711), Proyecto FONDECYT Postdoctoral-ANID (N°3210523), Proyecto FONDEF IDeA - SIA 2024 (ID24I10297), FONDECYT Regular 2025 (N°1251990) y los Proyectos FONDEQUIP adjudicados (IDs: EQM180201; EQM180230, y EQM150067).

También agradecemos la participación y colaboración de los siguientes investigadores, quienes de distintas maneras han contribuido al logro de los resultados mencionados en este artículo:

Dra. Carolina Gómez, Departamento de Farmacia, Facultad de Farmacia-UdeC. Dr. Iván González, Departamento de Fisiopatología, Facultad de Ciencias Biológicas-UdeC.

Dra. Carola Vergara, Departamento de Análisis Instrumental, Facultad de Farmacia-UdeC; y

Dra. Anali Rosas, Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Facultad de Agronomía UdeC.

The industry shows low photolyase productivity because it focuses solely on producing microalgal biomass without promoting photolyase accumulation within it, which limits the economic viability of this natural source. In this context, both the completed and ongoing projects aim to enhance or induce photolyase production in these microalgae. Furthermore, establishing collaboration agreements with microalgae-producing companies and cosmetic manufacturers will be essential to validate bioprocesses on an industrial scale. This will enable the transition of our technologies from the university setting to the industry, allowing nationally developed and produced products to reach both domestic and international markets

REFERENCIA

Vallejos-Almirall, A., Folch-Cano, C., Rosas, A., Vergara, C., 2020. Development of liquid chromatography tandem mass spectrometry method to quantify cyclobutane pyrimidine dimer photolyase activity by detection of 15mer oligonucleotide as reaction product. *J. Chromatogr. A* 1611, 460577.

<https://doi.org/10.1016/j.chroma.2019.460577>

Vallejos-Almirall, A., Riquelme, M., Uribe, E., Agurto-Muñoz, C., Rosas, A., Vergara, C., 2022. A new approach to the induction and recovery of *Synechococcus leopoliensis* CPD-photolyase for cosmetic applications. *J. Appl. Phycol.* 34, 2371–2382.

<https://doi.org/10.1007/s10811-022-02808-w>

Ramírez, N., Serey, M., Illanes, A., Piumetti, M., Ottone, C., 2021. Immobilization strategies of photolyases: Challenges and perspectives for DNA repairing application. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* 215. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2020.112113>

USO DE FITOGÉNICOS: COMPLEMENTO NATURAL PARA LA SALUD Y BIENESTAR ANIMAL EN ACUICULTURA.



ACP Ltda.

Jorge Martínez A.

Gerente Técnico ACP LTDA

Es necesario que la Acuicultura tenga un desarrollo sostenible, ya que se considera como la fuente más importante de proteína de origen animal o acuática para el consumo humano y se prevé que siga creciendo en el futuro próximo. Por ello, el uso y la adición de aditivos naturales derivados de plantas en las dieta como usos diversos de en los peces para mejorar su salud, y preservar el medio ambiente es de gran importancia en la acuicultura. En este sentido, nuevas herramientas biotecnológicas, como los compuestos idénticos a los naturales, se utilizan actualmente como aditivos alimentarios para fortalecer y estimular el sistema inmunitario de los peces y prevenir y/o controlar enfermedades, gracias a su menor costo y mayor disponibilidad. Lo mismo con los compuestos vegetales. Es un desafío generar y presentar los estudios más recientes en los que se han utilizado compuestos idénticos a los naturales en la dieta de los peces para establecer su posible uso en la acuicultura, al igual que los fitogénicos. Estos compuestos naturales y aquellos idénticos a los naturales (NIC's) pueden considerarse una alternativa promisoría para añadirse a las dietas de los peces con el fin de promover el crecimiento, manipular la microbiota intestinal, mejorar el estado inmunitario y oxidativo de los peces, así como controlar las infecciones bacterianas, parasitarias, virales y de variada etiología en esta importante industria acuícola. (García Beltrán, 2022); (Reverter et al. 2014).

Las futuras tendencias están en el desarrollo de terpenos y terpenoides como compuestos de diversos aceites esenciales como nuevos agentes antimicrobianos (da Cunha, A. et al, 2018), antifúngicos,

antiparasitarios y también con un potencial uso por su efecto antiviral sin olvidar de que muchos de estos terpenos, tienen un efecto sedativo o anestésico lo que los hace una herramienta útil apuntando al bienestar animal y el impacto directo que tienen en el medio ambiente y la inocuidad alimentaria. Los terpenos y sus derivados terpenoides son una clase de compuestos naturales presentes en una amplia gama de especies vegetales, constituyendo la clase más amplia y diversa de productos naturales con más de 80.000 compuestos estructuralmente diversos conocidos, según el Diccionario de Productos Naturales (<http://dnp.chemn.etbase.com>). Éstos son derivados de la vía de biosíntesis de isoprenoides, siendo los componentes principales de los aceites esenciales. Existen en diversas formas según el número de carbonos en su estructura principal (hemiterpenos

[C5], monoterpenos [C10], sesquiterpenos [C15], diterpenos [C20], sesterterpenos [C25], triterpenos [C30] y tetraterpenos [C40]), lo que influye en sus funcionalidades químicas. (Fig. 1) (Declaire et al., 2021). (Figura 1). Sin embargo, los terpenoides pueden subdividirse en alcoholes, aldehídos, éteres, ésteres, cetonas, fenoles y epóxidos. (Wiles et al., 2025)

Esto hace el creciente interés en la medicina complementaria y alternativa dentro del sector veterinario refleja una creciente tendencia entre los productores no tan sólo en acuicultura sino que también la industria pecuaria que buscan terapias naturales en el ámbito productivo [Bergh et al., 2021]. A pesar de la constante demostración de excelentes bioactividades de los terpenos de origen vegetal, se deben abordar varios desafíos antes de que los

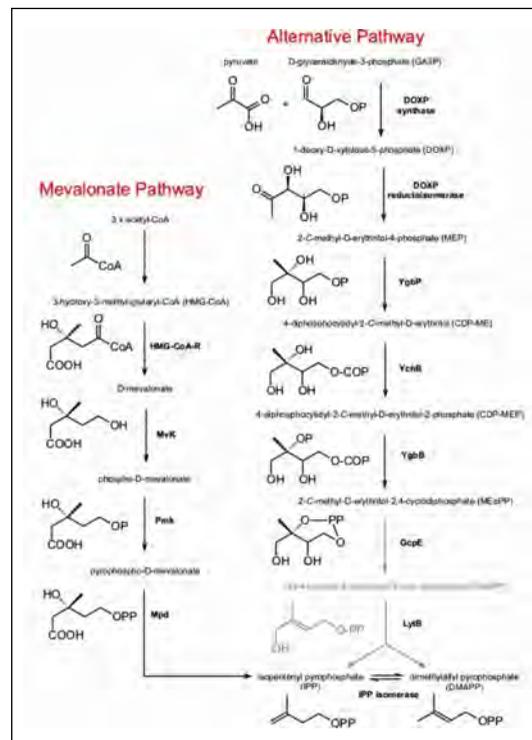


Figura 1: Diversidad estructural del core carbonado de las clases de terpenos.

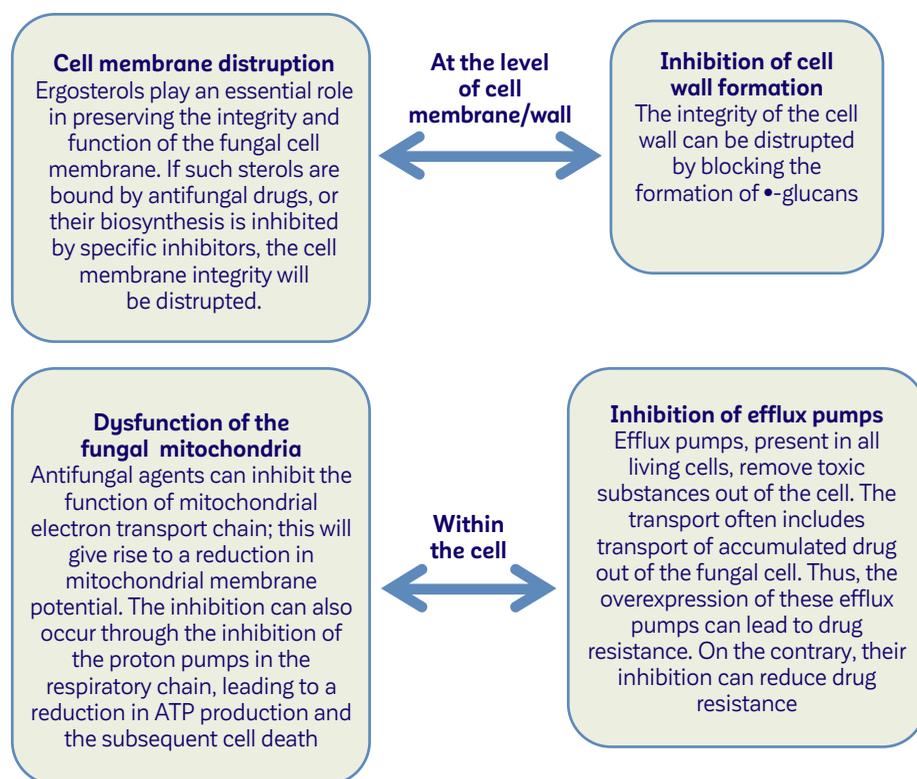


Figura 2: Acción antifúngica y antibacteriana de los terpenos de los aceites esenciales (EO's).

terpenos puedan traducirse con éxito en tratamientos clínicos. Problemas como la baja solubilidad, la baja biodisponibilidad y la falta de estudio de cinética, debiendo abordarse mediante la optimización de la formulación y evaluaciones de eficacia además de la cinética. Esto representa un gran desafío para la industria acuícola. Además, la complejidad de las interacciones entre los terpenos y los diferentes patógenos requiere mayor investigación para desentrañar sus mecanismos de acción precisos y optimizar su potencial terapéutico. La eficacia de los terpenos está estrechamente ligada a los grupos funcionales. El amplio espectro de microorganismos afectados plantea problemas con respecto al potencial terapéutico y preocupaciones sobre los desequilibrios de la microflora nativa del huésped. Otros desafíos se derivan del laborioso proceso de extracción, los altos costos y las variaciones en el contenido de terpenos entre lotes de plantas. Además, la necesidad de estandarización, la eficacia residual y la idoneidad a largo plazo, se requiere más investigación sobre la gran variedad de compuestos.

Los fitogénicos representan una alternativa promisoriosa para combatir diversos patógenos, como bacterias, hongos, virus y parásitos. Su eficacia se demuestra mediante diversos mecanismos, que abarcan el daño a las membranas bacterianas, la supresión de factores de virulencia y la interferencia con enzimas, toxinas y la formación de biopelículas (Figura 2). Los hallazgos subrayan el creciente potencial de la terapia con terpenos como alternativa viable o como complemento a los antibióticos convencionales para abordar las infecciones

bacterianas y los problemas de parasitismo en el ganado y, animales de compañía y ahora para controlar las infestaciones por caligus en la actividad acuícola. (Wiles et al.,

2025). Hay estudios que describen la acción de los fitogénicos como antibacterianos (Zahi, et al., 2015); (Guimaraes et al., 2019), Wiles et al., 2025) y los mecanismos de acción descritos como antiúngicos (Nazzaro et al., 2027). (Figura 2) y antibacterianos (Figura 3). Si bien es cierto la diversidad de acciones tienen los fitogénicos, estos primeramente actúan como antioxidantes, antiinflamatorios y como reguladores metabólicos.

ACCIÓN CONTRA ECTOPARÁSITOS

También se plantea el uso de estos terpenos y terpenoides naturales para establecer estrategias sostenibles para

el control de parásitos de diverso orden taxonómico en medicina veterinaria (Banuls et al., 2023); tales como helmintos, trematodos y cestodos dentro de los endoparásitos. Con respecto a los ectoparásitos hay una variedad de terpenos con eficacia probada contra algunos ectoparásitos; En el caso de los Piojos; estas infestaciones ocurren en cualquier entorno; sin embargo, son particularmente frecuentes en animales de producción, como el ganado, cuando se hacinan en invierno (Arther, 2009). En la producción de salmones se utilizan para controlar las infestaciones producidas por Caligus o piojo de mar varios tipos de grupos químicos, tales como; órgano fosforados, piretroides y bencilureas, entre otros y peróxido de hidrógeno. Desde hace un tiempo ya se está intentando, el uso de fitogénicos para ayudar en ese control mejorando las condiciones del medio ambiente, y mejorando el estado orgánico-sistémico de los peces, empleando estos terpenos, terpenoides y flavonoides asociados con ácidos orgánicos en la dieta como aditivos y uso de acondicionadores de agua, de esta manera complementan el mecanismo de acción de los químicos. Ciertos terpenos son altamente efectivos tanto contra piojos como contra sus huevos; (Franklin et al., 1999); (James et al., (2012) destacó el uso del terpeno aldehído citral, extraído del aceite esencial de limoncillo, y su combinación con otros terpenos es altamente efectiva para eliminar piojos y sus huevos, así como hormigas, ácaros y otros parásitos. Estudios centrados en piojos masticadores (*Bovicola ovis* y *B. ocellatus*) demostraron la notable eficacia del terpinen-4-ol, el principal componente del aceite de árbol de té (*Melaleuca alternifolia*) (James, 2012); (Callander, 2012). De igual manera, otros aceites esenciales, como el de lavanda (*Lavandula angustifolia*), menta

clavo (*Eugenia caryophyllata*) y alcanfor (*Cinnamomum camphora*), mostraron una potente toxicidad contra las infestaciones de piojos en burros y búfalos de agua (Ellse et al., 2013). La ventaja de las formulaciones con terpenos es que sus modos de acción observados sugieren una menor probabilidad de desarrollo de resistencia en comparación con los pesticidas convencionales (Callander, et al., 2012). Actualmente se ha reportado que el aceite esencial de especies del género *Eucalyptus* han mostrado resultados promisorios en el control de diversos insectos. Se ha estudiado en campo y laboratorio, la composición química, toxicidad y efecto repelente del aceite esencial de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* para el control de adultos de *Sitophilus zeamais*. Los análisis fitoquímicos indicaron que los mayores constituyentes del aceite esencial de ambas especies son 1,8-cineol (eucaliptol) (55,49% en *E. globulus* y 59,85% en *E. nitens*) y α -pineno (18,18% en *E. globulus* y 18,36% en *E. nitens*). Los aceites de ambas especies no presentaron toxicidad significativa por contacto aunque afectaron la emergencia de la F1 de *S. zeamais* la cual se redujo en más de un 50% con *E. globulus* en concentraciones de 4 y 8%. En la toxicidad como fumigante se obtuvieron valores de mortalidad superiores al 70% en los tratamientos de 20, 25, 30, 35 μ L con *E. nitens* y con 35 μ L en *E. globulus* (González Quiñones et al, 2016).

BIENESTAR ANIMAL

Se han realizado experiencias con fitogénicos usándolos como sedativos y/o anestésicos teniendo un efecto en el bienestar animal. Hay varios terpenos descritos presentes en aceites esenciales como: lavanda, melisa, clavo de olor y árbol de té entre otros. Uno de ellos que ha sido estudiado es el como el S-linalool. El S-(+)-linalool es un fitoquímico con efectos sedantes y anestésicos comprobados en varias especies. Sin embargo, se desconoce su perfil farmacocinético en peces. Por lo tanto, este un estudio describe la farmacocinética del S-(+)-linalool en bagres plateados anestesiados por inmersión. Los peces fueron expuestos a 153 mg/L de S-(+)-linalool durante un máximo de 30 min. Se recogieron muestras de sangre y cerebro en varios momentos hasta 4,0 h (0,5 h de anestesia

y 3,5 h de recuperación) después del inicio de la exposición. Antes de cada muestreo de tejido/sangre, se registró el estado de anestesia de cada animal. Tras la cuantificación del S-(+)-linalool en plasma y tejido cerebral mediante cromatografía de gases con ionización de llama, se construyeron curvas de concentración para la determinación de los parámetros farmacocinéticos. Se detectó S-(+)-linalool en el plasma y el cerebro dentro de los primeros 2 minutos (0,03 h) de exposición, con tiempos máximos (T_{max}) de 0,50 y 0,33 h y concentraciones máximas (C_{max}) de 129,33 μ g/mL y 113,92 μ g/g, respectivamente. Otros parámetros estimados para el plasma y el cerebro fueron vidas medias terminales (T_{1/2 β}) de 1,36 y 57,27 h, constantes de eliminación (K_{el}) de 0,50 y 0,01/h, áreas bajo la curva de cero a 4,0 h (AUC_{0-t}) de 120,98 μ g/mL/h y 250,57 μ g/g/h, y AUC de cero a infinito (ASC_{0- ∞}) de 132,15 μ g/mL/h y 4946,13 μ g/g/h, respectivamente. Después de 10 min (equivalente a un tiempo de recolección de 0,66 h) en un baño sin fármaco, todos los animales se recuperaron de la anestesia. Estos resultados sugieren que el S-(+)-linalool se absorbe rápidamente en el torrente sanguíneo y se distribuye ampliamente al cerebro. La eliminación es eficiente en el plasma, pero más lenta en el cerebro; sin embargo, este factor no afecta la recuperación de los animales, que se produce rápidamente. Por lo tanto, el S-(+)-linalool posee un perfil farmacocinético adecuado para su aplicación como anestésico en acuicultura. (Bianchini et al., 2017; Tsuchiya, 2017); Bianchini, et al, 2019). El uso de fitogénicos en Producción animal permite trabajar en una industria sostenible, con gran efecto positivo sobre el medio ambiente por la vida media de los terpenos y terpenoides y la alta biodegradabilidad hacen de una herramienta con mayor potencial de uso. En bienestar animal y salud sistémica de las especie lo hace una herramienta para la prevención y mitigación del estrés oxidativo, estrés celular y fisiológico entre otros.

El uso de fitogénicos; sin embargo, conlleva importantes desafíos en cuanto a conocer además de la eficacia contra diversos agentes; estudiar la cinética dependiente de la vía de aplicación; es decir, si es administración oral o aplicado por baño, e implementar técnicas analíticas en diferentes matrices, incluyendo la disolución en agua y estudios con relación a la proteómica en peces.

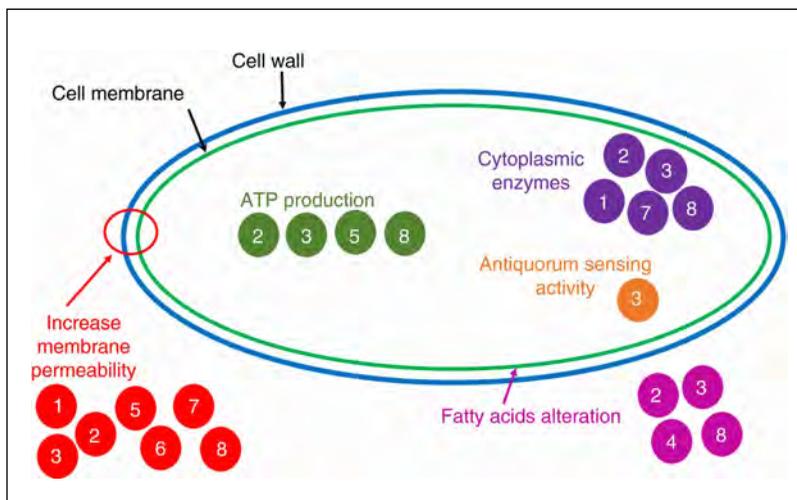


Figura 3: Mecanismos de acción y sitios diana de compuestos EO aislados en células microbianas. 1: timol, carvacrol, linalol, mentol, geraniol, acetato de linalilo, citronelal y piperitona; 2: eugenol, isoeugenol, vainillina, safrol y cinamaldehído; 3: 1,8 cineol; 4: β -pineno, linalol, cinamaldehído, geraniol, α -terpineno, β -citronelal y estragol; 5: citral; 6: acetato de linalilo; 7: p-cimeno, limoneno, terpineno, sabineno y pinenos; 8: borneol, alcanfor, α -pineno, canfona, verbenonona y acetato de bornilo. [La figura en color se puede ver en wiley on linelibrary.com] Adaptado de Nazzaro et al. (2013).

BIBLIOGRAFÍA

- Amorati, R. L.; L. Valgimigli, Methods to measure the antioxidant activity of phytochemicals and plant extracts, *J. Agric. Food Chem.* 66 (2018) 3324–3329, <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b01079>.
- Arther RG (2009) Mites and lice: biology and control. *Vet Clin North Am Small Anim Pract* 39(6):1159–1171. <https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2009.06.009>
- Banuls D, Brun J, Blua JL, Cadiergues MC (2023) A dietary plant extract formulation helps reduce flea populations in cats: a double-blind randomized study. *Pharmaceuticals* 16(2):1–10. <https://doi.org/10.3390/ph16020195>.
- Bergh A, Lund I, Boström A, Hyytiäinen H, Asplund K (2021) A systematic review of complementary and alternative veterinary medicine: 'miscellaneous therapies.' *Animals* 11(12):1–27. <https://doi.org/10.3390/ani11123356>
- Bianchini, A.E., Garlet, Q.I., da Cunha, J.A., et al., 2017. Monoterpenoids (thymol, carvacrol and S-(+)-linalool) with anesthetic activity in silver catfish (*Rhamdia quelen*): evaluation of acetylcholinesterase and GABAergic activity. *Braz. J. Med. Biol. Res.* 50, e6346. <https://doi.org/10.1590/1414-431x20176346>.
- Bianchini Adriane Erbe, Quelen Iane Garlet, Patrícia Rodrigues, Carine de Freitas Souza, Lenise de Lima Silva, Alessandro Casale dos Santos, Berta Maria Heinzmann, Bernardo Baldisserotto. Pharmacokinetics of S-(+)-linalool in silver catfish (*Rhamdia quelen*) after immersion bath: An anesthetic for aquaculture. *Aquaculture* 506 (2019) 302–307.
- Callander, J. T. Insecticidal and repellent effects of tea tree (*Melaleuca alternifolia*) oil against *Lucilia lupina* *Vet Parasitol* (2012).
- Cunha, A. da.; B.M. Heinzmann, B. Baldisserotto, The effects of essential oils and their major compounds on fish bacterial pathogens: a review, *J. Appl. Microbiol.* 125 (2018) 328–344, <https://doi.org/10.1111/jam.13911>. [10] B. Magnadottir, Immunological control of fish diseases, *J. Mar. Biotechnol.* 12 (2010) 361–379, <https://doi.org/10.1007/s10126-010-9279-x>.
- Déclaire Mabou F, Belinda I, Yossa N (2021) TERPENES : structural classification and biological activities. *IOSR J Pharm Biol Sci (IOSR-JPBS)* e-ISSN 16:2319–7676. <https://doi.org/10.9790/3008-1603012540>.
- Ellse L, Burden FA, Wall R (2013) Control of the chewing louse *Bovicola (Werneckiella) ocellatus* in donkeys, using essential oils. *Med Vet Entomol* 27(4):408–413. <https://doi.org/10.1111/mve.12004>.
- Franklin L, Ostroff G, Young D (1999) Terpene based pesticide treatments for killing terrestrial arthropods including, amongst others, lice, lice eggs, mites and ants. U.S. Patent 1US09/379,268.
- García Beltrán, José María; Esteban, María Angeles. *. Nature-identical compounds as feed additives in aquaculture- Fish and Shellfish Immunology 123 (2022) 409–416 1050-4648/© 2022.
- González-Guiñez, R1, Gonzalo Silva-Aguayo1*, Angélica Urbina-Parra1, y Macarena Gerding- González1 Essential Oil of *Eucalyptus globulus* Labill and *Eucalyptus nitens* H. Deane & Maiden (Myrtaceae) for the control of *Sitophilus zeamais* Motschulsky Chilean *J. Agric. Anim. Sci., ex Agro-Ciencia* (2016) 32(3): 110-116.
- Guimarães Aline Cristina 1, Leandra Martins Meireles 1, Mayara Fumiere Lemos 1, Marco Cesar Cunegundes Guimarães 2, Denise Coutinho Endringer 1, Marcio Fronza 1, Rodrigo Scherer 3. Antibacterial Activity of Terpenes and Terpenoids Present in Essential Oils. *Molecules*. 2019 Jul 5;24(13):2471. doi: 10.3390/molecules24132471.
- James, P.J. y Callander, J.T. (2012) Bioactivity of tea tree oil from *Melaleuca alternifolia* against sheep lice (*Bovicola ovis* Schrank) in vitro. *Vet Parasitol* 187(3–4):498–504. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2012.02.004>
- Nazzaro 1Filomena,* ID , Florinda Fratianni 1 ID , Raffaele Coppola 2 and Vincenzo De Feo 3. Review Essential Oils and Antifungal Activity. *Pharmaceuticals* 2017, 10, 86; doi:10.3390/ph10040086.
- Reverter, M.; N. Bontemps, D. Lecchini, B. Banaigs, P. Sasal, Use of plant extracts in fish aquaculture as an alternative to chemotherapy: current status and future perspectives, *Aquaculture* 433 (2014) 50–61, <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.05.048>.
- Tsuchiya, H. Anesthetic Agents of Plant Origin: A Review of Phytochemicals with Anesthetic Activity. *Molecules* 2017, 22.
- Wiles, D 1,2 · Jaclyn S. Pearson3,4,5 · Travis Beddoe1,2. Harnessing Plant-Derived Terpenoids for Novel Approaches in Combating Bacterial and Parasite Infections in Veterinary and Agricultural Settings. *Current Microbiology* (2025) 82:134.
- Zahi MR, Liang H, Yuan Q (2015) Improving the antimicrobial activity of d-limonene using a novel organogel-based nanoemulsion. *Food Control* 50:554–559. <https://doi.org/10.1016/j.foodc.ont.2014.10.001>.

Desarrollo de un nuevo alimento vivo basado en huevos y larvas del cirripedio gigante *Austromegabalanus psittacus* (“picoroco”) para la mejora productiva de estadios tempranos de peces marinos



Dr. Mauricio Pineda G.

Director Proyecto IDEa ID22110042
Unidad de Producción Acuícola (UPA). Universidad de los Lagos
mpineda@ulagos.cl

La acuicultura se ha consolidado como el sector de producción de alimentos de más rápido crecimiento a nivel global (Garlock y col., 2020). En particular, la producción de peces representa más del 50 % de la acuicultura mundial (FAO, 2024), y se posiciona como una fuente esencial de proteínas animales y ácidos grasos omega-3. En 2022, este rubro alcanzó un valor económico superior a los 130 mil millones de dólares, lo que corresponde al 53 % del valor total de la acuicultura global (Apromar, 2024). Dentro de este ámbito, los peces marinos de alto valor comercial como lubinas, bacalao, doradas, lenguados, seriolas, congrios, corvinas y cobias entre otros han ganado protagonismo, con una producción anual que supera los 5 millones de toneladas (Gentry et al., 2017).

En Chile, el desarrollo de la acuicultura marina ha avanzado en especies como la palometa (*Seriola lalandi*), con exportación de juveniles para engorda internacional; el turbot, con producción mensual de 200 a 300 kg para el mercado nacional; y el congrio colorado (*Genypterus chilensis*), con proyecciones interesantes de crecimiento. Además, se investigan alternativas para diversificar la producción y repoblamiento de especies como robalo, congrio dorado, cojinova, corvina, y bacalao.

El crecimiento de la producción mundial de peces marinos entre 2009 y 2019 fue del 73,3 % (Tveteras y col., 2020), impulsado tanto por el aumento de especies tradicionalmente cultivadas como por la incorporación de nuevas especies. Sin embargo, pese al incremento de la demanda, la producción de peces marinos se ha estancado recientemente debido a la escasez de juveniles disponibles para engorda (Giebichenstein y col., 2021). Este estancamiento responde principalmente a dos factores críticos: (1) una nutrición larvaria deficiente y (2) la limitación en el abastecimiento de artemia. En relación con la nutrición larvaria deficiente, el principal desafío consiste en las altas tasas de mortalidad larvaria, que alcanzan entre el 90 y 95 % antes de llegar a la etapa juvenil (Rønneseth y col., 2017). Estos resultados se asocian a factores de manejo, como la calidad y tipo de

alimento, los cuales influyen directamente en la supervivencia y el crecimiento de las larvas (Sontakke y col., 2019). Las dietas vivas basadas en rotíferos (*Brachionus sp.*) y artemia (*Artemia spp.*) han sido ampliamente utilizadas, aunque se reconoce que no proporcionan el perfil nutricional completo requerido por las larvas (Conceição y col., 2010; Radhakrishnan y col., 2019). Aunque el enriquecimiento nutricional ha mejorado ciertos parámetros de desarrollo (Hill y col., 2020), sus resultados siguen siendo variables.

Respecto al abastecimiento de artemia, existe una creciente preocupación por la dependencia de este recurso (Giebichenstein et al., 2021). La artemia es ampliamente utilizada en hatcheries de camarones y peces, y aunque ha sido un pilar fundamental en la expansión de la acuicultura, podría también convertirse en uno de sus principales obstáculos (Le y col., 2019). Las principales reservas mundiales de artemia ya han sido explotadas al máximo sostenible y el suministro global se mantiene estable en unas 3.000 a 4.000 toneladas anuales. Esta situación limita y encarece el uso de costos en la producción de peces marinos. Además, el cambio climático amenaza con afectar severamente las cosechas debido a la sensibilidad de los ecosistemas salinos (Obayes y col., 2020). Frente a estas limitaciones, se han explorado otras especies como los cladóceros (*Moina*, *Daphnia*), que presentan alta fecundidad y tolerancia a diversas temperaturas (Dodson y col., 2010). Sin embargo, por ser organismos de agua dulce, tienen baja tolerancia a la salinidad (Radhakrishnan et al., 2019), sobreviviendo solo unos minutos en agua de mar, lo que compromete su viabilidad como alimento larvario sin previo enriquecimiento lipídico.

Las dietas inertes, pese a más de 50 años de desarrollo, aún no han logrado sustituir de forma efectiva a las dietas vivas en la fase larvaria de peces marinos (Hawkyard y col., 2019; Radhakrishnan y col., 2019), principalmente por su baja digestibilidad y el deterioro que generan en la calidad del agua (Rasdy y Qin, 2016). Por otra parte, el cultivo continuo de rotíferos

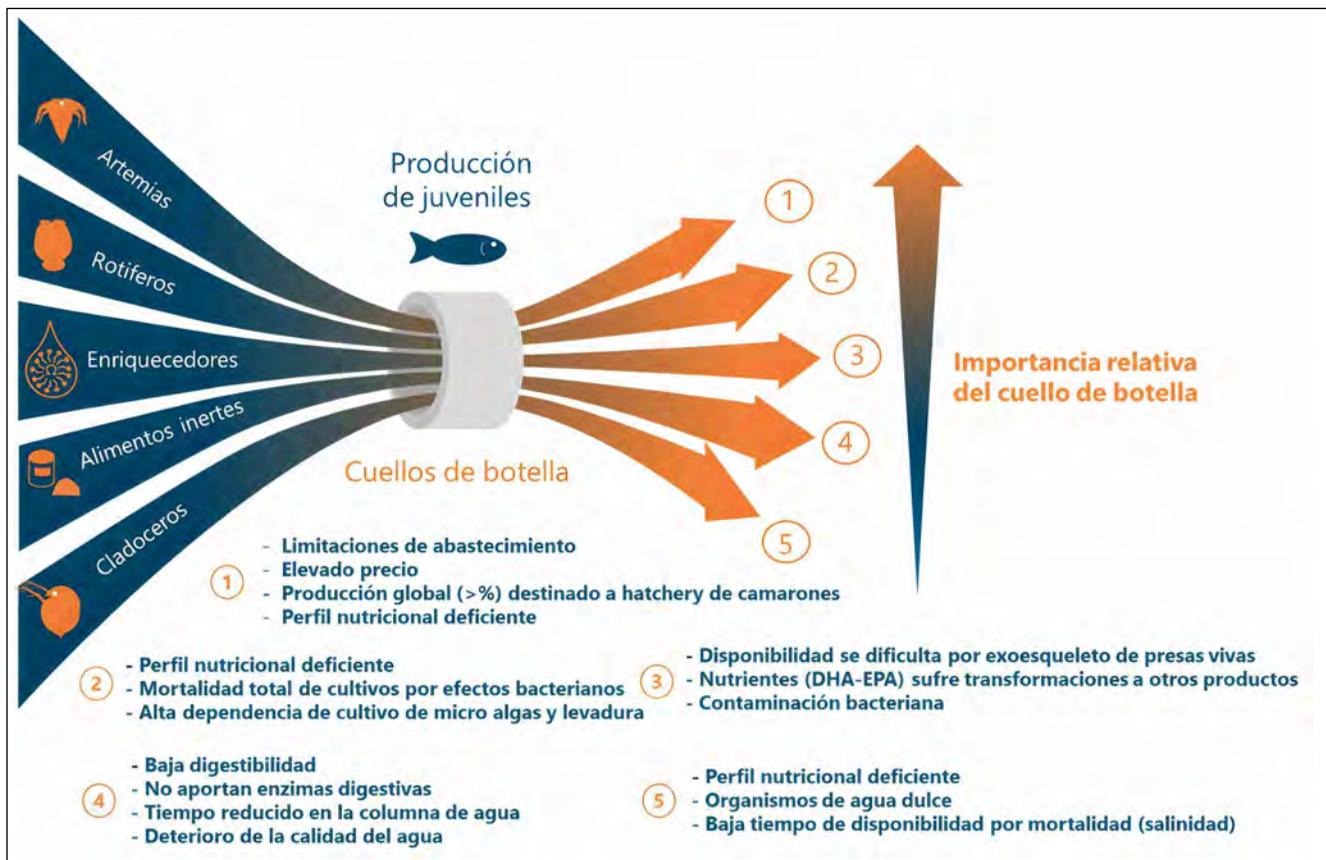


Figura 1: Cuellos de botella involucrados en el desarrollo larvario de peces marinos que limitan la producción de juveniles. (1) Artemia. (2) Rotíferos. (3) Enriquecedores. (4) Alimento inerte. (5) Cladóceros.

y artemia en hatcheries está asociado a frecuentes colonizaciones bacterianas, incluyendo patógenos que impactan negativamente en los resultados productivos (Dhert, 1996). En cultivos comerciales, las caídas completas de rotíferos por brotes bacterianos son comunes y representan un riesgo importante para la producción de juveniles (Mzimba, 2014).

SOLUCIÓN PROPUESTA

Dentro del marco del proyecto ANID IDeA ID22110042 y con la colaboración de las empresas Colorado Chile SpA y Cultivos Colche Ltda se propuso desarrollar un nuevo alimento vivo basado en huevos embrionados y larvas nauplius del crustáceo *Austromegabalanus psittacus* como alternativa para alimentar larvas de peces marinos en hatcheries. "Picoroco" es un cirripedio gigante y de hábitos gregarios, siendo uno de los organismos incrustantes más abundantes en la zona intermareal y submareal de la costa de Chile. Es un hermafrodita simultáneo, con fertilización cruzada entre individuos adyacentes. Después de la fertilización, los adultos poseen cuidado parental y mantienen los huevos fecundados durante su desarrollo hasta la etapa Nauplius I, los cuales son liberados a la columna de agua. Un adulto puede producir hasta un millón de huevos, con valores de fecundidad más altos en rangos de tamaño intermedio (López, 1994).

Este alimento presentaría ventajas nutricionales, de tamaño y disponibilidad, lo que favorecería la sobrevivencia y crecimiento de los peces en etapas tempranas. Las tecnologías de cultivo desarrolladas en el proyecto son similares a las usadas en el cultivo de choritos. Su alta fecundidad y alimentación omnívora permitirían producir un alimento de calidad y bajo costo. El prototipo a producir incluye huevos y larvas nauplius en distintas fases (pre nauplius, NI y NII), las cuales son muy similares a nauplius y metanauplius de artemia. La prueba de concepto evaluará su efectividad como sustituto del alimento vivo tradicional. El desarrollo contempla tecnologías para manejo de reproductores, desove masivo e incubación de huevos, buscando generar un paquete tecnológico integral para su producción y aplicación en acuicultura.

RESULTADOS

Para la captación de semilla de picoroco se fabricaron colectores de placas y tubos HDPE, los cuales se dispusieron en sistemas long-line. Durante la primera fase del proyecto se probaron los tipos de colectores, distintas profundidades y épocas de captación de semilla (Fig. 2). Los resultados mostraron que el mejor desempeño de captación fue en los colectores tubulares bajo los 5 metros de profundidad. En la segunda etapa del proyecto se evaluó: (1) Obtención masiva de semilla, (2) Crecimiento, (3)



Figura 2: Instalación de colectores para captación masiva de semilla de picoroco. (A) Traslado de colectores a los sistemas suspendidos. (B) Instalación de colectores. (C) Amarre de colectores a la línea madre. (D) Colectores instalados en long-line.

Obtención de reproductores, (4) Fecundación y desove. Se dispusieron en total 250 sistemas colectores en bahía Metri en 5 pulsos de instalación de 50 sistemas entre diciembre de 2022 y septiembre de 2023.

CAPTACIÓN MASIVA DE SEMILLAS

En cada tubo colector se midió la densidad de captación de *A. psittacus*, (N° de individuos/cm²) contando visualmente los ejemplares adheridos según la profundidad (Fig. 3). En todos los pulsos de instalación hubo captación y a modo de ejemplo se muestra los colectores instalados en diciembre de 2022 en donde se registró una captación a partir del mes de febrero de 2023 (apreciación visual). Durante el mes de abril la captación promedio fue de 0.038, 0.052 y 0.059 ind/cm² para 5, 6 y 7 metros de profundidad respectivamente, siendo el promedio general de los sistemas instalados de 0.050 ind/cm² (Fig. 3).

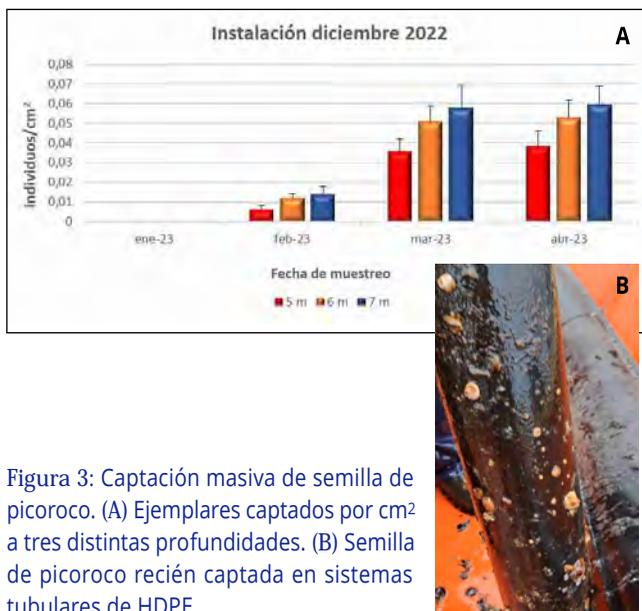


Figura 3: Captación masiva de semilla de picoroco. (A) Ejemplares captados por cm² a tres distintas profundidades. (B) Semilla de picoroco recién captada en sistemas tubulares de HDPE.

CRECIMIENTO

La medida para establecer el tamaño de los ejemplares es el largo carino rostral (LCR); (Fig. 4). El crecimiento de los ejemplares es rápido en donde transcurrido un año desde la instalación de los colectores (diciembre 2022), los individuos alcanzan cerca de 2,5 mm de LCR (Fig. 4). La talla comercial es de 3,5 mm de LCR, la que se obtiene 6 meses después (junio 2024), lo que representa un ciclo de cultivo de 16 meses.

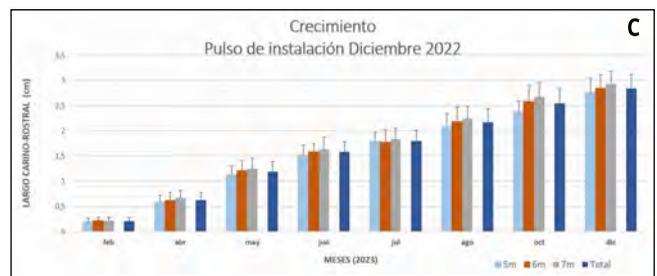
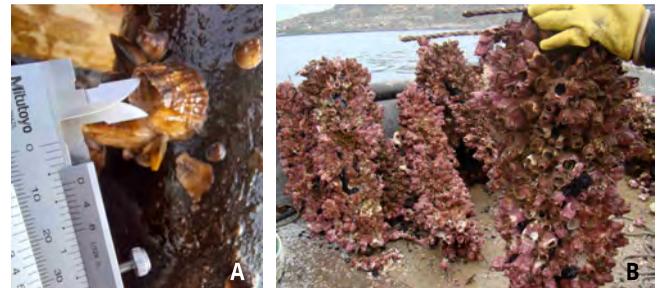


Figura 4: (A) Medición de crecimiento mediante largo carino rostral (LCR). (B) Ejemplares de picoroco de 2,5 mm de longitud de LCR cultivados en sistemas tubulares de HDPE. (C) Crecimiento de *A. psittacus* por un periodo de un año desde la postura de colectores.

FECUNDACIÓN Y DESOVE

La evaluación de la madurez de la gónada se inicia cuando los individuos capturados alcanzan los 5 mm de LCR. Cuando los ejemplares obtuvieron los 2,5 mm de LCR se constató que la gónada femenina se encontraba madura en un 90 % de los individuos. Los resultados muestran que se produce apareamiento sexual en los sistemas de cultivo, produciéndose la fecundación de los huevos y desarrollo embrionario. Cuando se evidencia que los huevos se encuentran en estado de pre nauplius se realiza la inducción del desove. Se probó inicialmente el desove individual de los ejemplares y posteriormente los mejores resultados se aplicaron al desove masivo con la finalidad de obtener miles de larvas. Se testearon diferentes métodos para lograr la liberación de las larvas que incluyeron elevación y reducción de la temperatura del agua, además de exposición aérea (fuera del agua) por un periodo corto y otro prolongado.

El mejor método de desove obtenido fue la exposición aérea larga y su posterior re inmersión en agua de mar, metodología



que fue aplicada masivamente posteriormente a los reproductores obtenidos en los sistemas tubulares de captación de semilla y crecimiento (Fig. 5). Con este método de desove el número de larvas nauplius promedio obtenido por cada individuo fue de 92.990 larvas y el número de huevos promedio en estado de pre nauplius fue de 24.114 huevos (Fig. 5).

Al día de hoy se encuentran desarrollados los sistemas de cultivo para captación de semilla, crecimiento y obtención de reproductores. También se conocen los antecedentes biológicos y ambientales para su cultivo y reproducción. Actualmente se esta a la espera de la obtención de larvas de Turbot (*Scophthalmus maximus*) y congrio colorado (*Genypterus chilensis*) para la validación de

sobrevivencia y crecimiento en larvas de peces marinos utilizando como dieta el nuevo alimento vivo en condiciones productivas a nivel piloto. En la figura 6 se muestra los huevos y larvas obtenidas de los desoves masivos y que constituyen una nueva alternativa de dieta viva para el desarrollo del cultivo de peces marinos en Chile.

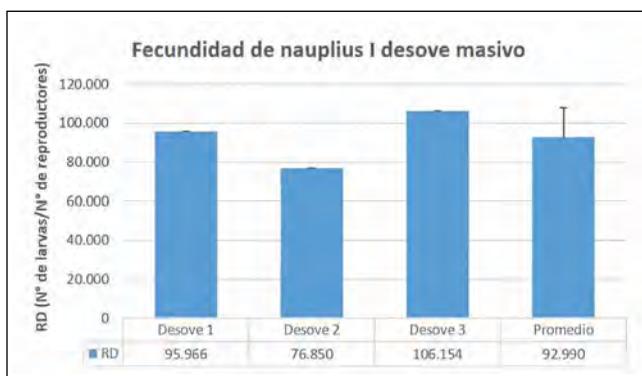


Figura 5: Desove masivo mediante exposición aérea larga utilizando sistemas de cultivo de HDPE conteniendo reproductores de *A. psittacus*. (A) Disposición de los sistemas de cultivo (tubos de HDPE) dentro de los estanques de desove masivo. (B y C) Reproductores de picoroco durante la re inmersión en agua de mar para la inducción al desove. (D) Disposición de una fuente lumínica para la concentración de las larvas mediante fototactismo positivo para la posterior extracción, tamizado y conteo. (E) Fecundidad de larvas nauplius I en el desove masivo. (F) Fecundidad de huevos en estado de pre nauplius en el desove masivo.

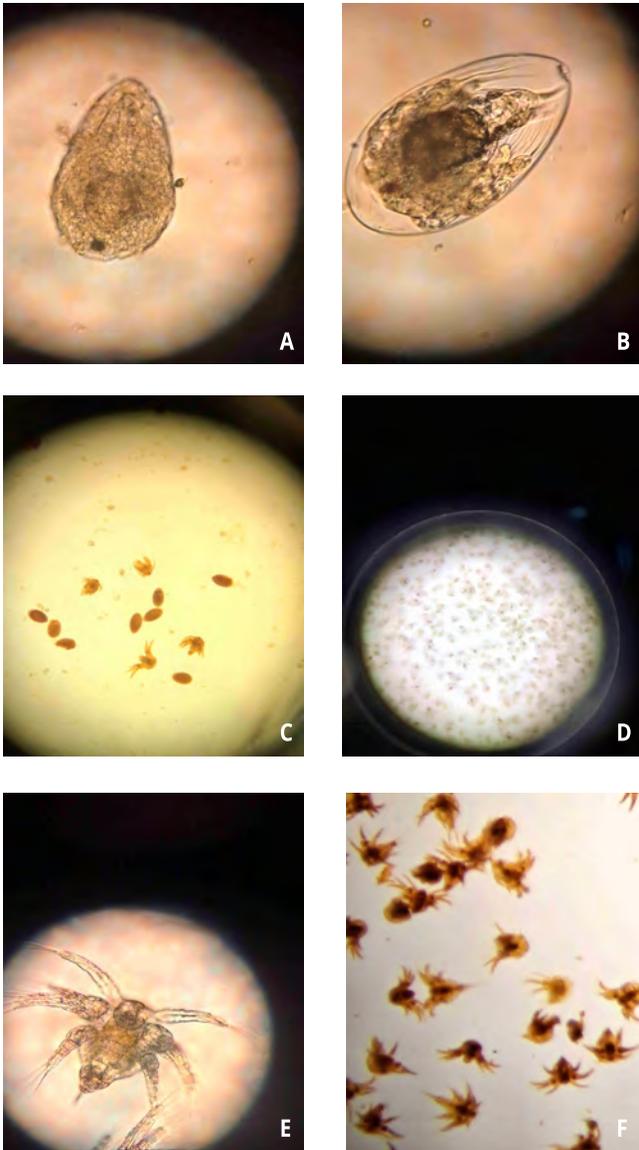


Figura 6: Huevos y larvas de *A. psittacus* liberadas mediante los diferentes protocolos experimentales de desove. (A) Huevo desovado en estado de pre nauplius temprano (10x). (B) Huevo desovado en estado de pre nauplius tardío (10x). (C) Desove de pre nauplius simultáneamente con nauplius I provenientes de un solo reproductor (Desove individual. Fijadas en lugol). (D) Larvas nauplius I provenientes de desove masivo. (E) Larva nauplius I (10x). (F) Larvas nauplius I fijadas en lugol.

REFERENCIAS

Apromar (2024). Informe la Acuicultura en España 2024. Disponible en: <https://www.apromar.es>

FAO (2024). The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. Disponible en: <https://www.fao.org>

Conceição, y col. (2010). Investigación en acuicultura, 41 (5), 613-614

Garlock, y col. (2020). Fisheries Science and Aquaculture, 28 (1), 107 - 116.

Giebichenstein, y col. (2021). Aquaculture Research. 2022 (53), 544-558.

Dhert, P (1996). Rotifers. In: Sorgeloos P, Lavens P (eds) pp. 49-78. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome

Dodson, y col. (2010). North American freshwater invertebrates (3rd ed), Academic Press. 773-827

Gentry, y col. (2017). Nature Ecology & Evolution, 1(9), 1317-1324

Hawkyard, y col. (2019). Aquaculture, 512, 734285.

Le y col. (2019). Reviews in aquaculture. 11(4),1169-1175

López, D.A. (1994). Tesis Universidad Católica de Chile: 1 -181 pp.

Obayes, y col. (2020). Annals of Tropical Medicine and Public Health 23(19)

Mzimba L.M. (2014).

<https://www.grocentre.is/static/gro/publication/263/document/lucia13prfa.pdf>

Radhakrishnan, y col. (2019). Aquaculture Research. 2019; 00:1-17.

Rasdi, J.G. y Qin (2016). Aquac. Res., 47, 1-20

Rønneseth, y col. (2017). Journal of Fish Diseases, 40(10), 1373-1385.

Sontakke, y col. (2019). Aquaculture, 510, 182- 190.

Tveteras, y col. (2020).

<https://www.globalseafood.org/advocate/goal-2019-revisiony-pronostico-de-la-produccion-mundial-de-peces/>.

DIMARINE

Garantizamos calidad, protección y rendimiento de cada uno de nuestros productos. Brindamos soluciones pensadas para los medios acuáticos y adaptados a los requerimientos de cada cliente. Más de 40 años de experiencia y dedicación en el rubro náutico nos respaldan y nos permiten ser una alternativa fiable, con una comunicación abierta y transparente hacia nuestros clientes.

No solo nos preocupamos por el correcto manejo de residuos, sino también por la adecuada aplicación de la ley REP, que regula los envases y embalajes declarada el 2021 al ministerio.

Dimarine, pasión por el agua.

Experto

Fiable

Aventurero

El rol del trigo en la elaboración de Alimentos para Salmónidos: Desafíos y Oportunidades para la Producción Local Sostenible

Proyecto apoyado por



Daniel Nieto Díaz-Muñoz PhD ¹, Javier Zúñiga Rebolledo ²

¹ Gerente Programa Tecnológico PTEC-INVA.

² Bioquímico, Investigador Calidad de Trigo. INIA Carillanca

www.inva.cl

Salmones Antártica – Corfo

RESUMEN

La industria de la salmicultura en Chile depende en gran medida de diversos insumos importados para la elaboración de alimentos para peces. Entre estos insumos, el trigo juega un papel clave como aglomerante en la producción de pellets extruidos para salmónidos. Este artículo analiza la importancia del trigo en la elaboración de alimentos para salmónidos, los desafíos técnicos asociados a la caracterización y selección de variedades de trigo adecuadas, y las oportunidades para fomentar la producción local sostenible de este insumo clave. Se destaca la necesidad de conocer el impacto de componentes específicos del grano en la calidad de los pellets, de conocer la variabilidad de las características del grano en función de variedad, localidad, manejo y año, la necesidad de estandarizar metodologías analíticas y generar un lenguaje técnico común entre los distintos actores de la cadena productiva, todo lo anterior para optimizar el uso del trigo en la alimentación de salmónidos.

INTRODUCCIÓN

La salmicultura representa un sector estratégico para la economía chilena, generando ingresos significativos y empleando a miles de personas. Sin embargo, la alta dependencia de insumos importados, en particular para la alimentación de los peces, genera vulnerabilidad y aumenta la huella de carbono de la industria. En este contexto, el Programa Tecnológico para la Producción Local de Insumos Nutricionales para la Acuicultura (PTEC-INVA) busca promover el desarrollo de cultivos locales como el trigo, lupino, arveja, entre otros, para reducir la dependencia de importaciones y fomentar la sostenibilidad de la salmicultura.

El trigo se utiliza principalmente como aglomerante en la elaboración de pellets extruidos para salmónidos, contribuyendo a la calidad física y la estabilidad del alimento en el agua. La

selección de variedades de trigo con características específicas es fundamental para optimizar el proceso de extrusión y garantizar la calidad nutricional del alimento.

EL TRIGO COMO INSUMO CLAVE EN LA ALIMENTACIÓN DE SALMÓNIDOS

El trigo es un componente importante en la formulación de alimentos para salmónidos, donde actúa como aglomerante. La calidad del trigo utilizado influye directamente en las propiedades físicas de los pellets, tales como la dureza, los finos, la flotabilidad y la estabilidad en el agua, factores que a su vez afectan el consumo y la digestibilidad del alimento por parte de los peces.

El desempeño del trigo en el proceso de extrusión y la calidad final del pellet dependen primariamente del contenido y las propiedades fisicoquímicas del almidón y las proteínas del grano, que a su vez son afectados por factores como la variedad, la localidad, el manejo y el año. Por lo tanto, para la industria resulta crucial conocer cuál combinación de variedad, localidad y manejo genera grano apto para producir pellets de la mejor calidad.

DESAFÍOS TÉCNICOS EN LA CARACTERIZACIÓN Y SELECCIÓN DE VARIEDADES DE TRIGO

Uno de los principales desafíos identificados es la falta de conocimiento acabado respecto de la importancia relativa de los componentes del grano sobre la aptitud aglutinante del trigo. Este conocimiento está ampliamente disponible para industrias como la del pan, donde se conoce el rol preeminente del contenido y tipo gluten en el desarrollo de diferentes tipos de productos, lo que se traduce en la existencia de criterios relativamente uniformes de clasificación del trigo, parámetros de compra y desarrollo de variedades.

La diversidad de equipamiento instalado, la diversidad de productos finales fabricados y la escala de las pruebas podrían explicar la diversidad de criterios de compra de grano por parte de la industria, que en algunos casos privilegian el almidón y en otros el gluten. Cerrar esta brecha de conocimiento podría contribuir a uniformar los criterios de operación y de compra, e incidir positivamente en la identificación de variedades de trigo con aptitud aglutinante, o incluso en el desarrollo de nuevas variedades.

Otro desafío importante es la falta de conocimiento sistemático respecto de la variación de los componentes del grano de trigo relevantes para la industria en función de la variedad, la localidad, el manejo y el año. Esta información contribuiría a identificar las variedades de interés, así como las zonas y prácticas que resulten en un volumen de grano de calidad consistente. Datos correspondientes a los años 2014-2016 muestran que el coeficiente de variación del contenido de gluten para una variedad de trigo puede ser de hasta 26% de la media a través de las diversas regiones y años (Figura 1). No se conocen datos similares para el caso del contenido de almidón.

Por otra parte, Chile presenta una tasa de recambio de variedades relativamente alta, del orden del 80% en 10 años (Figura 2), que implica la necesidad de una continua renovación de la información sobre el perfil de calidad de las variedades liberadas.

Otro desafío identificado tiene que ver con la falta de estandarización de metodologías específicas para caracterizar la calidad del trigo. En particular, el uso de parámetros de ensayo variables del Rapid Visco Analyzer (RVA™) genera evaluaciones de la viscosidad relativa que no son comparables entre laboratorios, dificultando así la identificación de las variedades de trigo más apropiadas para la industria acuícola.

Finalmente, existe la necesidad de aumentar la comunicación en torno a la aptitud aglutinante del trigo en el sector, para lo cual se debe propender a adquirir y utilizar un lenguaje técnico común entre agricultores, productores de alimentos y acuicultores. La comunicación efectiva y la colaboración entre estos actores son esenciales para alinear la producción de trigo con las necesidades específicas de la industria salmonera y garantizar un suministro sostenible y eficiente de este insumo clave.

OPORTUNIDADES PARA LA PRODUCCIÓN LOCAL SOSTENIBLE DE TRIGO SALMONERO

El fomento de la producción local de trigo para la industria salmonera presenta una serie de oportunidades para el desarrollo sostenible del sector. La sustitución de importaciones de trigo por producción local puede reducir la huella de carbono de la

industria, generar empleo en zonas rurales y fortalecer la seguridad alimentaria del país.

Para aprovechar estas oportunidades, es necesario impulsar la investigación y el desarrollo de variedades de trigo adaptadas a las condiciones agroclimáticas de la macrozona sur y austral de Chile, y que cumplan con los requerimientos de calidad de la industria salmonera. Además, es fundamental promover la adopción de prácticas agrícolas sustentables que minimicen el impacto ambiental de la producción de trigo, tales como la rotación de cultivos y el manejo integrado de plagas y enfermedades.

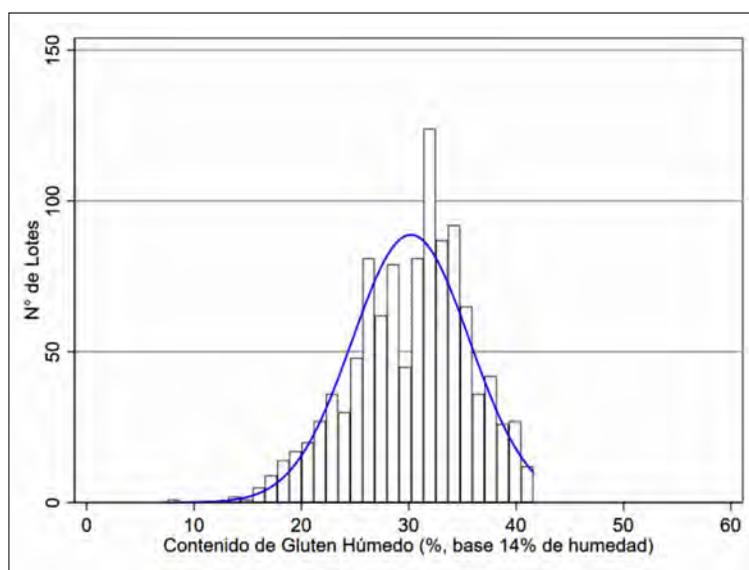


Figura 1: Distribución del contenido de gluten de una variedad chilena de trigo harinero en cuatro regiones durante tres temporadas agrícolas. El contenido de gluten húmedo promedio observado fue de 30%.



Figura 2: Recambio de variedades certificadas de trigo harinero en Chile en el período 2014 - 2024.

Componentes del grano de trigo relevantes para la elaboración de dietas para salmones					
		% Mín.	% Máx.		
CARBOHIDRATOS	Almidón	60	75	Amilopeptina	70 - 80
				Amilosa	20 - 30
	No Almidón	4	8	Arabinosilanos	4 - 8
				Fructanos	0,6 - 2,6
PROTEÍNAS	Gluten	5	16	Gluteninas	4 - 10
				Gladinas	3 - 8
	No Gluten	2	3	Albúminas	0,5 - 0,6
				Globulinas	1,8 - 2,1

Figura 3: Componentes del grano de trigo: carbohidratos y proteínas, valores mínimos y máximos.



Figura 4: Trigo en Aysén, INIA.

Teniendo a la vista todos los antecedentes ya presentados, el 13 de noviembre del 2024 se realizó un Taller organizado por el PTEC INVA, en el local de Intesal, con la asistencia de los fabricantes de alimento (Skretting, Biomar, Salmofood, Aquachile, Salmones Antártica), la Sociedad Nacional de Agricultura, y todos los coejcutores del Programa Tecnológico, donde se revisó todo el tema en su profunda complejidad, surgiendo los siguientes puntos para una estrategia de acción:

Estrategias propuestas para Avanzar en la Producción de Trigo Salmonero

- Estandarización de metodologías analíticas: Establecer protocolos comunes para la caracterización del trigo, incluyendo parámetros como el contenido de gluten, la viscosidad y la digestibilidad del almidón.
- Desarrollo de variedades de trigo adaptadas: Impulsar la investigación y el mejoramiento genético de variedades de trigo que cumplan con los requerimientos de la industria salmoneera y que sean adaptadas a las condiciones locales.
- Fomento de la colaboración: Promover la colaboración entre agricultores, productores de alimentos y acuicultores para alinear la producción de trigo con las necesidades de la industria.
- Incentivos a la producción sostenible: Establecer incentivos económicos y técnicos para fomentar la adopción de prácticas agrícolas sustentables en la producción de trigo.
- Definición del proyecto “trigo salmonicultor”: Se discutió la integración de variedades del INIA, la caracterización de componentes como almidón y gluten, y la realización de ensayos en planta y campo.
- Establecimiento de metodologías analíticas: Se resaltó la necesidad de estandarizar técnicas de medición (por ejemplo, para determinar contenido de gluten, viscosidad y sedimentación) para comparar datos de distintos laboratorios.
- Oportunidades y desafíos: Se enfatizó la relevancia de generar insumos locales para alimentar a la industria salmonicultora, que representa una parte importante de la economía chilena,

al mismo tiempo que se enfrentan retos como la inversión en tecnología y la coordinación entre sectores agropecuarios y acuícolas.

- Acuerdos de calidad y encuestas técnicas: Documentos como el Product Quality Agreement de Skretting y encuestas sobre el uso de estructurantes en la extrusión destacan parámetros técnicos y las necesidades específicas de la industria.

CONCLUSIONES

El trigo desempeña un papel fundamental en la elaboración de alimentos para salmónidos, y su producción local sostenible representa una oportunidad para fortalecer la industria salmoneera chilena. Para aprovechar esta oportunidad, es necesario superar los desafíos técnicos asociados a la caracterización y selección de variedades de trigo, y promover la colaboración entre los distintos actores de la cadena productiva. La implementación de estrategias que fomenten la estandarización de metodologías analíticas, el desarrollo de variedades adaptadas y la adopción de prácticas agrícolas sustentables permitirá avanzar hacia una producción de trigo salmonero que contribuya al desarrollo sostenible de la industria acuícola chilena.



Figura 5: Cantidad de hectáreas necesarias de agregar a las ya producidas, para abastecer a la industria del alimento para salmones.



RAW

VOLVER AL ORIGEN

Nutrición de precisión Dieta diseñada para salmón orgánico

Formulada con ingredientes vegetales orgánicos, no GMO, ingredientes marinos sostenibles y pigmentos naturales, con alta palatabilidad, digestibilidad y eficiente conversión. Alimento certificado bajo el Reglamento (UE) 2018/848.

Salmofood es la primera empresa en Chile certificada para la fabricación de alimentos destinados al cultivo y producción de salmón orgánico.



LotaProtein

Part of TripleNine



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

HARINA PREMIUM

www.lotaprotein.cl

