



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura

FAO
ACTAS DE
PESCA Y
ACUICULTURA

ISSN 2071-1026

74

Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina

Taller Técnico Regional de la FAO
24-26 de junio de 2024
Puerto Varas, Chile

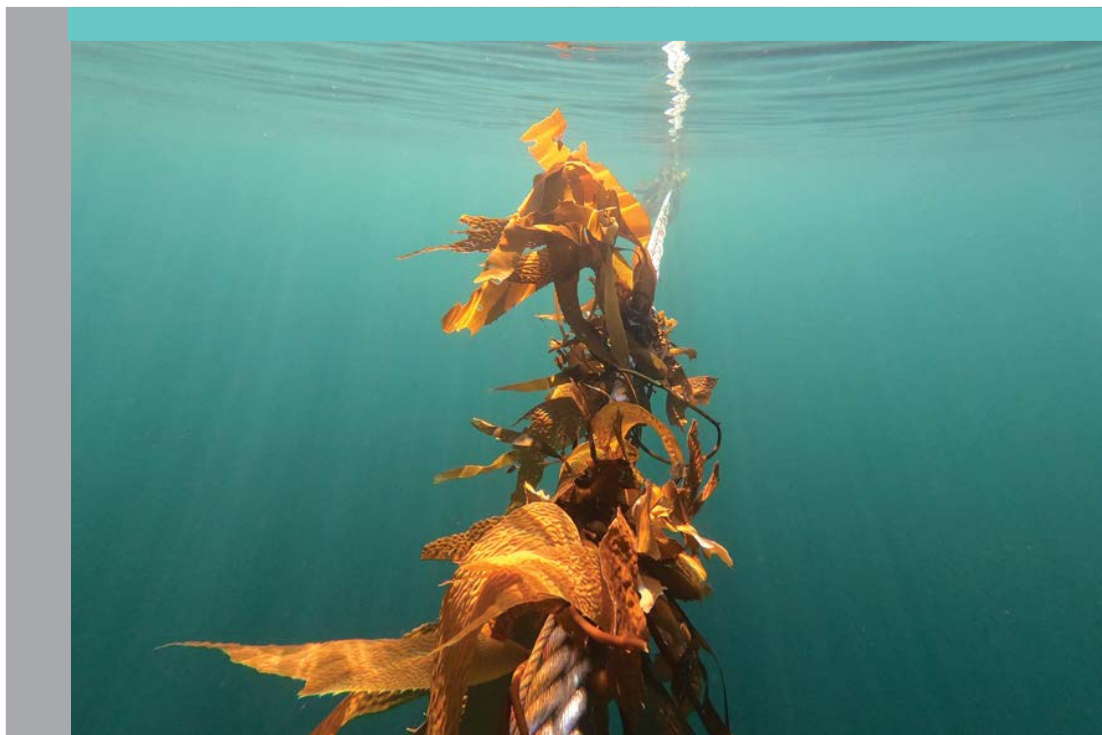


Ilustración de la portada:

Proyecto de acuicultura experimental de la macroalga parda *Macrocystis pyrifera* (conocida como huiro flotador o kelp gigante) en Los Quincheles, región de Aysén, Chile. La Iniciativa utiliza estructuras flotantes, como líneas de cultivo, con el objetivo de regenerar los ecosistemas marinos y fomentar alternativas productivas sostenibles para las comunidades costeras. ©FAO/M.J. de la Fuente, Huiro Regenerativo.

Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina

Taller Técnico Regional de la FAO
24-26 de junio de 2024
Puerto Varas, Chile

Editado por

Alessandro Lovatelli

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma

José Aguilar-Manjarrez

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Santiago

Pedro Murúa Andrade

Ana Farías Molina

Universidad Austral de Chile, Puerto Montt

Cita requerida:

Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Murúa Andrade, P. y Farías Molina, A. (coords.). 2025. *Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO 24-26 de junio de 2024 Puerto Varas, Chile*. FAO Actas de Pesca y Acuicultura n.º 74. Roma, FAO. <https://doi.org/10.4060/cd5237es>

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), juicio alguno sobre la condición jurídica o el nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, ni sobre sus autoridades, ni respecto de la demarcación de sus fronteras o límites. La mención de empresas o productos de fabricantes en particular, estén o no patentados, no implica que la FAO los apruebe o recomiende de preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan.

Las opiniones expresadas en este producto informativo son las de su(s) autor(es) y no reflejan necesariamente los puntos de vista o políticas de la FAO.

ISSN 2071-1026 [Impresa]

ISSN 2707-5540 [En línea]

ISBN 978-92-5-139807-4

© FAO, 2025



Algunos derechos reservados. Esta obra se distribuye bajo licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.es>).

De acuerdo con las condiciones de la licencia, se permite copiar, redistribuir y adaptar la obra, siempre que se cite correctamente. En ningún uso que se haga de esta obra debe darse a entender que la FAO refrenda una organización, productos o servicios específicos. No está permitido utilizar el logotipo de la FAO. Si la obra se traduce o se adapta, debe añadirse el siguiente descargo de responsabilidad junto a la cita requerida: “La presente traducción [o adaptación] no es obra de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). La FAO no se hace responsable del contenido ni de la exactitud de la traducción [o la adaptación]. La edición original en [idioma] será el texto autorizado”.

Toda controversia que surja en relación con la presente licencia y que no pueda resolverse de forma amistosa se someterá a arbitraje de conformidad con el Reglamento de Arbitraje de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil Internacional (CNUDMI). Las partes quedarán obligadas por todo laudo arbitral emitido como consecuencia de dicho arbitraje como resolución final de la controversia.

Materiales de terceros. Esta licencia Creative Commons CC BY 4.0 no se aplica a material incluido en esta publicación de cuyos derechos de autor no sea titular la FAO. Si se desea reutilizar material contenido en esta obra que sea propiedad de terceros, por ejemplo, cuadros, gráficos o imágenes, corresponde al usuario determinar si se necesita autorización para tal reutilización y obtener la autorización del titular de los derechos de autor. El riesgo de que se deriven reclamaciones de la infracción de los derechos de uso de un elemento que sea propiedad de terceros recae exclusivamente sobre el usuario.

Fotografías de la FAO. Las fotografías de la FAO que puedan aparecer en esta obra no están sujetas a la licencia Creative Commons arriba mencionada. Las consultas sobre el uso de cualquier fotografía de la FAO deben remitirse a: photo-library@fao.org.

Ventas, derechos y licencias. Los productos informativos de la FAO en forma electrónica, así como la lista de distribuidores a través de los cuales pueden adquirirse ejemplares impresos, están disponibles en el sitio web de la Organización (www.fao.org/publications/es). Si tienen preguntas de carácter general sobre las publicaciones de la FAO, sírvanse escribir a: publications@fao.org. Las consultas relativas a derechos y licencias sobre las publicaciones deben remitirse a: copyright@fao.org.

Preparación de este documento

Los documentos que figuran en este informe se han preparado como material de apoyo para el Taller Regional “Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina (ACUIALGAS)”, celebrado en Puerto Varas, Chile, del 24 al 27 de junio de 2024. El evento fue organizado por el Instituto de Acuicultura y Medio Ambiente de la Universidad Austral de Chile (UACH), en colaboración con la División de Pesca y Acuicultura de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. El taller contó con la participación de 27 expertos y expertas internacionales de siete países (la Argentina, el Brasil, Chile, el Ecuador, México, el Perú y la República Bolivariana de Venezuela), así como de representantes de la FAO. Entre los participantes se incluyeron actores de los sectores académico, gubernamental, industrial y comunidades costeras vinculadas al cultivo de macroalgas.

Para apoyar las discusiones del Taller, se comisionaron seis informes técnicos que ofrecen un análisis detallado sobre las principales dimensiones que inciden en la diversificación y expansión de la acuicultura de macroalgas en la región. Además, se presentaron 13 estudios de caso que enriquecieron los debates mediante experiencias concretas.

El objetivo principal del Taller fue fortalecer el desarrollo sostenible de la acuicultura de macroalgas en América Latina. Los objetivos específicos fueron: (i) Intercambiar experiencias sobre el desarrollo y operación de la acuicultura de macroalgas; (ii) Identificar oportunidades y formular recomendaciones para la expansión sostenible de la acuicultura de macroalgas; (iii) Detectar brechas en las políticas nacionales y analizar cómo los marcos estratégicos y normativos pueden fortalecer el desarrollo de la acuicultura de macroalgas y la creación de capacidades; y (iv) Definir prioridades estratégicas que orienten el trabajo futuro de la FAO, los estados y gobiernos, y la industria en el fortalecimiento y expansión sostenible de la acuicultura de macroalgas.

Para alcanzar estos objetivos, el taller se estructuró en torno a seis áreas temáticas: (i) La alimentación y los productos biotecnológicos derivados de macroalgas; (ii) Gobernanza y planificación normativa de la acuicultura de macroalgas; (iii) Gestión sostenible y aprovechamiento de los servicios ecosistémicos en los cultivos de macroalgas; (iv) Perspectiva técnica de las tecnologías de cultivo de macroalgas; (v) Responsabilidad social, el trabajo digno, la inclusión de la juventud y la igualdad de género en el cultivo de macroalgas; y (vi) Cadenas de valor, acceso a mercados y comercio.

Además, teniendo en cuenta que uno de los propósitos fundamentales del taller ACUIALGAS era generar recomendaciones concretas, se solicitó a cada participante, durante el desarrollo del evento, la formulación de un mensaje fuerza y una acción para lograrlo. Este ejercicio permitió identificar aspectos más estratégicos para el desarrollo sostenible del cultivo de macroalgas en la región.

La Secretaría del Taller fue responsable de la redacción del informe, a partir de las aportaciones de las personas expertas participantes, e incorporó tanto las conclusiones generales como las recomendaciones finales.

Por último, este documento constituye una base estratégica para orientar políticas públicas, fortalecer capacidades técnicas y promover la inversión en el cultivo de macroalgas, con miras a desarrollar una acuicultura más equitativa, resiliente y sostenible. Se espera que sus recomendaciones sean acogidas por agencias de desarrollo, entidades gubernamentales y grupos de investigación, tanto nacionales como internacionales, comprometidos con la consolidación y sostenibilidad del sector.

Las fotografías incluidas en el informe fueron tomadas por los autores, salvo que se indique lo contrario.

La revisión final de todos los documentos estuvo a cargo de los revisores técnicos A. Lovatelli, J. Aguilar-Manjarrez, P. Murúa y A. Farías. La edición de estilo de todo el documento fue realizada por Verónica Román Fierro.

Resumen

El cultivo de macroalgas en América Latina y el Caribe representa una oportunidad estratégica para contribuir a la seguridad alimentaria, la sostenibilidad ambiental y el desarrollo económico de la región. Aunque a nivel global la producción de macroalgas ha mostrado un crecimiento sostenido, en América Latina y el Caribe su participación sigue siendo marginal, con apenas un 2 % de los volúmenes totales reportados. Esta situación plantea importantes desafíos, pero también ofrece un amplio margen de crecimiento, especialmente si se tiene en cuenta la gran diversidad de ecosistemas marinos, las especies nativas y la existencia de comunidades costeras con vínculos ancestrales con el uso de macroalgas.

En respuesta a esta realidad, la FAO, junto con otras instituciones, organizó el taller “Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina” (ACUIALGAS) en Puerto Varas, Chile, en junio de 2024. El objetivo del encuentro fue impulsar la acuicultura sostenible de macroalgas en la región, abordando dimensiones clave como el consumo humano, la gobernanza, los aspectos técnicos, sociales y económicos, el acceso a los mercados y el aprovechamiento de servicios ecosistémicos. Participaron 27 expertos de siete países latinoamericanos (la Argentina, el Brasil, Chile, el Ecuador, México, el Perú y la República Bolivariana de Venezuela), representando a sectores públicos, privados, académicos y comunitarios, quienes compartieron sus experiencias y conocimientos a través de seis informes comisionados y 13 estudios de caso.

El taller se estructuró en torno a seis áreas temáticas. En la primera, relacionada con la alimentación y los productos biotecnológicos, se destacó el valor nutricional de las macroalgas, en particular por su alto contenido en yodo y compuestos bioactivos. A pesar de que su consumo ha disminuido en muchas regiones, las macroalgas tienen un gran potencial para reincorporarse en la dieta humana, en particular como alimentos funcionales y saludables. Para esto, se requiere fomentar la investigación sobre sus propiedades, crear bases de datos de composición nutricional, y promover formatos de consumo innovadores que se adapten a los hábitos alimentarios actuales.

La segunda área abordó la gobernanza y la planificación normativa. Actualmente, la mayoría de los marcos regulatorios en la región están orientados a la acuicultura en general y no contemplan las particularidades del cultivo de macroalgas. Se evidenció la necesidad de contar con regulaciones más claras, eficientes y coordinadas que promuevan un desarrollo armónico de esta actividad, sin trabas innecesarias. Además, se propuso avanzar en el ordenamiento del borde costero, diferenciar los permisos según el tipo de cultivo y mejorar la integración institucional, por ejemplo, a través de ventanillas únicas. También se enfatizó la aplicación del principio precautorio para la introducción de especies exóticas.

En la tercera área, se exploraron los servicios ecosistémicos asociados al cultivo de macroalgas. Estos organismos desempeñan funciones ecológicas críticas, como la absorción de CO₂ y nutrientes, la mejora de la calidad del agua y la provisión de hábitats. Se promovió el uso de modelos de acuicultura multitrófica integrada (IMTA) y acuicultura restaurativa, que permiten aumentar tanto la rentabilidad como los beneficios ambientales de los cultivos. También se abordaron riesgos como la bioseguridad, el cambio climático y la contaminación de las áreas de cultivo, que exigen monitoreo, investigación y planes de adaptación específicos para cada región.

La cuarta área temática se centró en los aspectos técnicos y las tecnologías de cultivo. Aunque existen experiencias exitosas en países como el Brasil y Chile, la mayoría de las iniciativas siguen siendo incipientes o de pequeña escala. Se propuso fortalecer la

investigación y el desarrollo tecnológico a lo largo de toda la cadena productiva, desde la selección de especies y materiales genéticos hasta el procesamiento poscosecha. El uso de inteligencia artificial y biotecnología fue identificado como una oportunidad clave para mejorar la eficiencia, la trazabilidad y la sostenibilidad de los cultivos. Asimismo, se recomendó fomentar la capacitación y la transferencia de tecnología a comunidades costeras, integrando los conocimientos tradicionales con los científicos.

La quinta sesión trató sobre la inclusión social, el trabajo digno, la juventud y la equidad de género. Se reconoció que el cultivo de macroalgas ofrece oportunidades significativas para mejorar la calidad de vida en comunidades costeras, especialmente para mujeres y jóvenes, quienes históricamente han estado subrepresentados en otras formas de acuicultura. El enfoque comunitario y asociativo, junto con la capacitación en modelos de negocio inclusivos, fueron identificados como pilares fundamentales para la sostenibilidad social del sector. También se subrayó la importancia de recopilar datos sociales desagregados y fortalecer las estructuras locales con el fin de reducir brechas de género, edad y acceso a recursos.

La sexta y última área abordó las cadenas de valor, el acceso a mercados y el comercio. Aunque la región cuenta con especies de macroalgas de alto potencial, muchas de ellas aún no se han explotado comercialmente. Para lograr una expansión económicamente sostenible del cultivo, es fundamental promover la diversificación de productos, la innovación en derivados y el fortalecimiento de los vínculos entre el ámbito académico, la industria y las comunidades. La valorización de servicios ecosistémicos, el diseño de estrategias de marketing y la identificación de nuevos nichos de mercado —como los sectores nutracéutico, cosmético y bioenergético— también fueron destacados como elementos estratégicos.

Como resultado del taller, se definieron acciones transversales que deberán ser lideradas por la FAO, los gobiernos y la industria. La FAO deberá apoyar la creación de una plataforma internacional sobre macroalgas, brindar asistencia técnica, facilitar el intercambio de experiencias entre países y generar información útil para las comunidades productoras. Los gobiernos deben fortalecer los marcos normativos, financiar investigación e innovación, y desarrollar programas de capacitación para cultivadores. En cuanto a la industria —tanto artesanal como empresarial— tiene el desafío de integrar los conocimientos locales, diversificar su oferta y promover la equidad en el desarrollo del sector.

Finalmente, los mensajes clave compartidos por los participantes reflejaron un consenso sobre la necesidad de garantizar la sostenibilidad ambiental, económica y social del cultivo de macroalgas. También se resaltó la importancia de que los beneficios lleguen directamente a las comunidades costeras, de diversificar especies y productos, acceder a mercados estratégicos, y generar empleo digno. En conjunto, estos lineamientos ofrecen una hoja de ruta para transformar el cultivo de macroalgas en un motor de desarrollo sostenible para América Latina.

Índice

Preparación de este documento	iii
Resumen	v
Prologo	ix
Agradecimientos	x
Abreviaturas	xi
GÉNESIS DEL TALLER	1
INFORME DEL TALLER	5
INFORMES COMISIONADOS	29
Perspectivas sobre el uso de macroalgas como fuente alimentaria de alto valor en América Latina	31
JAVIER PARADA	
Estado actual y retos del marco regulatorio para el cultivo de macroalgas en América Latina	49
JOSÉ AVILA-PELTROCHE	
Desafíos y oportunidades para la consolidación de la acuicultura de macroalgas en América Latina: perspectivas ecológicas, ambientales y de bioseguridad	67
JOSÉ A. ZERTUCHE-GONZÁLEZ Y JOSÉ MIGUEL SANDOVAL-GIL	
Perspectiva técnica de las tecnologías de cultivo de macroalgas en América Latina y el Caribe	79
CAROLINA CAMUS Y ALEJANDRO H. BUSCHMANN	
Perspectiva territorial y social del cultivo de macroalgas de pequeña escala en América Latina	93
MARCELA AVILA Y CECILIA GODOY	
Desafíos y oportunidades económicas para fortalecer la producción de algas marinas en América Latina y el Caribe	123
WAGNER C. VALENTI, FELIPE P.A. COHEN Y PATRICIA MORAES-VALENTI	
ESTUDIO DE CASOS	147
Perspectivas para la alimentación: uso de macroalgas cultivadas en Chile para la alimentación humana	149
CRISTIAN ROGEL-CASTILLO, ANDREA DONOSO-YOULTON, CRISTIAN BULBOA-CONTADOR Y CRISTIAN AGURTO-MUÑOZ	
Utilización de macroalgas para la extracción de ficocoloides en la Argentina	157
MELANIE HEBE HUGHES	
Gobernanza en el cultivo de macroalgas comerciales en Chile	167
MARISOL ALVAREZ SOTOMAYOR	
Viabilidad legal para la diversificación y el escalamiento de cultivos de macroalgas en América Latina: el caso de <i>Kappaphycus</i>	175
MIGUEL SEPÚLVEDA	

El potencial rol de la acuicultura de macroalgas en un contexto de cambio climático	185
PABLO P. LEAL Y LUIS A. HENRÍQUEZ-ANTIPA	
Bioseguridad en la acuicultura de macroalgas chilenas: el caso de <i>Gracilaria chilensis</i>	195
PEDRO MURÚA	
Acuicultura de macroalgas en el Perú	205
PAUL M. BALTAZAR GUERRERO, MAX CASTAÑEDA-FRANCO Y ARTURO MIRES-REYES	
Estado actual y perspectivas del cultivo de macroalgas en el Ecuador	221
ADRIÁN MARQUEZ	
Aspectos técnicos de la acuicultura de macroalgas en la República Bolivariana de Venezuela	231
RAÚL E. RINCONES, SABRINA LOVERA CAMPOS Y JOSÉ L. NARVAÉZ	
Perspectiva antropológica del uso del maritorio en comunidades algueras	243
FRANCISCO ARAOS	
Aspectos socioeconómicos de acuicultores de macroalgas en pequeña escala en el Brasil	251
MARCELLA ARAÚJO DO AMARAL CARNEIRO	
Cultivo de macroalgas tropicales en México: perspectiva económica, financiamiento y rentabilidad	259
DANIEL ROBLEDO, ROGER DOMÍNGUEZ-MAY Y GERMÁN PONCE-DÍAZ	
Aspectos económicos y viabilidad del cultivo de macroalgas en la costa peruana	271
JUAN DIEGO DUPUY	
ANEXOS	279
1. Prospecto del taller	281
2. Programa del taller	283
3. Lista de participantes	285
4. Perfil de expertos	287
5. Fotografía de grupo	295

Agradecimientos

Esta publicación es el resultado de la contribución de numerosos expertos y expertas, a quienes se agradece sinceramente su dedicación y compromiso. Su participación fue fundamental para la exitosa organización, implementación y resultados del taller regional sobre la acuicultura de macroalgas (ACUIALGAS), realizado en Puerto Varas, Chile.

Nuestro especial agradecimiento para el gobierno de Chile, la Universidad Austral de Chile (UACH) y el Instituto de Acuicultura y Medio Ambiente, ubicados en Valdivia y Puerto Montt, respectivamente, por su contribución y el sustancial apoyo brindado en la organización del taller. Queremos expresar también un agradecimiento especial para Ana Fariás y Pedro Murúa, miembros del comité organizador del Taller, por su implicación constante a lo largo de todas las etapas de planificación y ejecución del evento.

Reconocemos con gratitud a Viviana Espinoza y Astrid Luna, investigadoras del *Hatchery de Invertebrados Marinos* de la UACH, y a Claudia Poblete, secretaria de postgrado de la Sede de la UACH en Puerto Montt, por su apoyo logístico durante el Taller y por su eficiente coordinación en la recopilación de los estudios presentados en este documento.

Agradecemos cordialmente a Teri Neer (FAO, Roma) y a Constanza González Viera (Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe) por su valiosa asistencia en asuntos administrativos, la cual facilitó una colaboración eficiente y transparente con la UACH.

Expresamos nuestro sincero agradecimiento a los consultores de la FAO, especialmente a Verónica Román Fierro, por su excelente labor en la edición de estilo. También queremos reconocer la contribución de José Castilla en la diagramación de la publicación. La organización del taller y la elaboración de este documento fueron posibles gracias a los fondos proporcionados por el Programa Regular de la FAO.

Prologo

La presente publicación de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), *Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina*, ofrece un análisis detallado en un momento en que la sostenibilidad y la innovación son esenciales para abordar los desafíos actuales. Este trabajo se alinea con los esfuerzos de la FAO para transformar los sistemas alimentarios acuáticos y promover un desarrollo sostenible.

La publicación promueve la seguridad alimentaria y nutricional, a la vez que impulsa la sostenibilidad ambiental. En este contexto, el cultivo de macroalgas representa una opción clave: contribuye a mejorar la nutrición, mitiga los efectos del cambio climático y genera empleo en comunidades costeras, quienes cumplen un rol esencial para la sostenibilidad de numerosos países latinoamericanos.

El estudio subraya la relevancia del cultivo de macroalgas para alcanzar las cuatro mejoras establecidas en el Marco Estratégico de la FAO: una mejor producción, una mejor nutrición, un mejor medio ambiente y una vida mejor. Su cultivo es eficiente, requiere insumos mínimos y se desarrolla sin competir por tierra cultivable ni agua dulce. Desde el punto de vista nutricional, ofrece proteínas, minerales y compuestos bioactivos de alto valor. Ambientalmente, actúa como sumidero de carbono y biofiltro natural. Y en el ámbito social, fortalece el empleo sostenible e inclusivo en las zonas costeras.

La *Transformación Azul* es un eje central de esta publicación, destacando el compromiso de la FAO con la reestructuración de los sistemas alimentarios acuáticos hacia modelos más inclusivos, sostenibles y equitativos. En este contexto, las macroalgas aportan a esta transformación como un recurso importante para la producción de alimentos, biocombustibles y otros productos.

Este estudio se enmarca en la bioeconomía sostenible, orientada a desarrollar modelos productivos que utilicen los recursos biológicos de manera eficiente y respetuosa con el ambiente. Como recurso renovable, las macroalgas desempeñan un papel crucial en esta transición hacia una economía más inclusiva y menos dependiente de combustibles fósiles.

La FAO en América Latina y el Caribe está contribuyendo a la promoción de la innovación en el sector agroalimentario y continuará colaborando de manera articulada con los países de la región para fortalecer capacidades técnicas, fomentar la investigación y consolidar alianzas estratégicas que impulsen el desarrollo de este sector.

Asimismo, esta publicación adquiere un valor especial para la Comisión de Pesca en Pequeña Escala, Artesanal y Acuicultura de América Latina y el Caribe (COPPESAALC), al facilitar el intercambio de conocimientos y buenas prácticas en torno al cultivo de macroalgas. A través de sus iniciativas, la COPPESAALC puede contribuir a la formulación de políticas públicas y al fortalecimiento de la cooperación regional, impulsando una acuicultura sostenible y resiliente, en consonancia con el Marco Estratégico de la Organización.

Este informe reafirma el compromiso de la FAO con la innovación en los sistemas alimentarios acuáticos, destacando el cultivo de macroalgas como una oportunidad de desarrollo para América Latina y el Caribe.



Maya Takagi
Líder del Programa Regional para
América Latina y el Caribe
Organización de las Naciones Unidas
para la Alimentación y la Agricultura
Santiago, Chile



Manuel Barange
Subdirector General y Director División
de Pesca y Acuicultura (NFI)
Organización de las Naciones Unidas
para la Alimentación y la Agricultura
Roma

Abreviaturas

AMERB	Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos
AMTI	acuicultura multitrófica integrada
ANID	Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (Chile)
APAFG	Asociación de Productores y Procesadores de Algas de Flecheiras y Guajiru (Brasil)
APE	acuicultura de pequeña escala
B2B	business-to-business (empresa a empresa)
B2C	business-to-customer (empresa a cliente)
CCTA	Comités Científico Técnicos de Acuicultura
CENAIM	Centro Nacional de Acuicultura e Investigaciones Marinas (Ecuador)
CID	carbono inorgánico disuelto
CONAPESCA	Comisión Nacional de Pesca y Acuicultura (México)
CORFO	Corporación de Fomento de la Producción (Chile)
ECMPO	Espacios Costeros Marinos de Pueblos Originarios (Chile)
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral (Ecuador)
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FOB	free on board (franco a bordo)
I+D+i	investigación, desarrollo e innovación
IBAMA	Instituto Brasileiro de Medio Ambiente y Recursos Naturales
IDER	Instituto de Desarrollo Local y Regional (Brasil)
IFOP	Instituto de Fomento Pesquero (Chile)
INDESPA	Instituto Nacional de Desarrollo Sustentable de la Pesca Artesanal y de la Acuicultura de Pequeña Escala
INS	International Numbering System (Sistema Internacional de Numeración)
INSOPESCA	Instituto Socialista de la Pesca y Acuicultura (República Bolivariana de Venezuela)
LGPA	Ley General de Pesca y Acuicultura (Chile)
LGPAS	Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentables (México)
LICMA	Laboratorio de Investigación en Cultivos Marinos (Perú)
MAGAP	Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca (Ecuador)
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONG	organización no gubernamental
PMC	Productos Marinos de las Californias
PVC	polyvinyl chloride (cloruro de polivinilo)
SADER	Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (México)
SERNAPESCA	Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (Chile)
SUBPESCA	Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (Chile)
TIR	tasa interna de retorno
TNC	The Nature Conservancy
TRL	nivel de preparación tecnológica (technology readiness level)
USD	dólares estadounidenses
VAN	valor actual neto

Génesis del Taller

ANTECEDENTES

La acuicultura de macroalgas es un sector en pleno crecimiento, con un alto potencial para contribuir a la seguridad alimentaria, mejorar los medios de vida, generar oportunidades económicas y ofrecer servicios ecosistémicos de gran valor. En particular, el cultivo de macroalgas marinas ha suscitado un interés creciente debido a su capacidad para abordar desafíos medioambientales, sociales y económicos. Este interés quedó patente en la Cumbre de Sistemas Alimentarios de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2021, donde se destacó el impulso de soluciones basadas en la naturaleza como una de las cinco áreas clave de acción para alcanzar los objetivos de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

Las macroalgas, como organismos productores primarios, representan un tipo de cultivo con una baja huella ambiental y múltiples beneficios ecosistémicos. Entre estos beneficios, destacan la capacidad de absorber nutrientes y residuos orgánicos e inorgánicos procedentes de actividades humanas en aguas costeras, la protección del litoral contra la erosión causada por el oleaje y la creación de hábitats (por ejemplo, arrecifes y bosques submarinos) que favorecen la biodiversidad marina.

El cultivo de macroalgas está bien posicionado para proporcionar medios de vida sostenibles, equitativos y resilientes a las comunidades costeras. Además, puede desempeñar un papel clave en el abastecimiento de alimentos tanto a nivel nacional como internacional, con el potencial de transformar los sistemas alimentarios a escala global. A ello se suma la capacidad para generar grandes volúmenes de biomasa, lo que podría contribuir a mitigar algunos efectos del cambio climático. Por otro lado, el elevado contenido de principios bioactivos en las macroalgas, bajo condiciones de cultivo específicas, abre la puerta al desarrollo biotecnológico de subproductos y coproductos de alto valor para diversos mercados. No obstante, este último aspecto requiere una mayor inversión en investigación que garantice sistemas de producción sostenibles a medio y largo plazo.

A nivel global, la producción de macroalgas ha mostrado un crecimiento significativo, con un aumento medio anual del 5,8 % entre 2000 y 2022 (FAO, 2024). Sin embargo, América Latina y el Caribe han registrado una contracción del 21 % en el mismo periodo, posiblemente debido a una menor recopilación de datos sobre desembarques o a la variabilidad en la producción y demanda de recursos algales. Más preocupante aún es que la acuicultura de macroalgas representa solo el 2 % de los volúmenes totales reportados en la región. No obstante, dada la creciente demanda mundial, esta brecha puede interpretarse como una oportunidad de desarrollo, lo que evidencia un amplio margen para su expansión. En esta región, la actividad macroalgal presenta una gran diversidad de realidades: algunos países cuentan con industrias consolidadas y marcos regulatorios bien establecidos, mientras que otros se encuentran en etapas tempranas o aún no han explorado este sector.

En respuesta a la solicitud de sus miembros, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ha llevado a cabo recientemente tres iniciativas para evaluar el estado del cultivo de macroalgas en América Latina y el Caribe.

La primera actividad se llevó a cabo en octubre de 2022 con el webinario “**Diálogo político para la acuicultura de macroalgas en América Latina y el Caribe**”, cuyo objetivo fue identificar y compartir estrategias y políticas nacionales que puedan impulsar el desarrollo de la acuicultura de macroalgas en línea con los Objetivos de

Desarrollo Sostenible (ODS). En particular, se abordó su contribución a la seguridad alimentaria, la generación de ingresos, la mejora de los medios de vida y la restauración de ecosistemas.

La segunda actividad tuvo lugar en la “**12.ª reunión del Subcomité de Acuicultura**”, celebrada en Hermosillo, México, del 16 al 19 de mayo de 2023. En este encuentro, la Secretaría presentó el documento *Reconocimiento y mejora de la contribución de las algas al desarrollo de la acuicultura mundial* (FAO, 2023a). El Subcomité destacó el potencial del cultivo de algas marinas para fortalecer la producción global de alimentos, mejorar los medios de vida y generar ingresos. Asimismo, subrayó la necesidad de aumentar el apoyo y las inversiones para identificar zonas de cultivo idóneas, desarrollar oportunidades de cultivo integrado y abordar desafíos relacionados con la inocuidad alimentaria, las enfermedades, la genética y los mercados. Además, se reconoció la importancia de fortalecer las capacidades de cultivo y se instó a la FAO a continuar brindando asistencia técnica y promoviendo intercambios técnicos entre los actores del sector (FAO, 2023b).

La tercera actividad fue el taller “**Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina (ACUIALGAS)**”, realizado en Puerto Varas, Chile, del 24 al 27 de junio de 2024. El presente informe recoge un resumen de los resultados y conclusiones del taller, además de proponer oportunidades y recomendaciones en seis áreas clave para el desarrollo de la acuicultura de macroalgas en la región.

PROPÓSITO

En un contexto de creciente demanda mundial de macroalgas, el taller tuvo como propósito impulsar y fortalecer la acuicultura sostenible de macroalgas en América Latina, abordando aspectos clave como su uso en la alimentación humana, la gobernanza, el impacto ambiental, los aspectos técnicos, sociales y económicos, así como el desarrollo de cadenas de valor, el acceso a los mercados y el comercio. Con ello, se buscó identificar oportunidades y formular recomendaciones que orienten futuras acciones por parte de la FAO, los gobiernos y los productores de macroalgas.

IMPLEMENTACIÓN Y PARTICIPACIÓN

El taller fue organizado por el Instituto de Acuicultura y Medio Ambiente de la Universidad Austral de Chile (UACH), en colaboración con la División de Pesca y Acuicultura de la FAO y la Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. El evento contó con la participación de 27 expertas y expertos internacionales procedentes de siete países (la Argentina, el Brasil, Chile, el Ecuador, México, el Perú y la República Bolivariana de Venezuela), así como de dos miembros del personal de la FAO. Entre ellos, se incluyeron representantes del sector empresarial dedicado al cultivo comercial de macroalgas y de la pesca extractiva artesanal de macroalgas. Los participantes, provenientes de los sectores académico, gubernamental e industrial, aportaron una valiosa diversidad de perspectivas sobre los temas abordados. La lista completa de participantes se encuentra en el Anexo 3 y sus perfiles en el Anexo 4.

La recopilación de información se llevó a cabo mediante la elaboración de seis informes comisionados, los cuales presentan revisiones generales y exhaustivas sobre el estado del arte en las principales dimensiones relevantes que influyen en la diversificación y expansión de la acuicultura de macroalgas en la región. Las temáticas abordadas en las seis sesiones del Taller ACUIALGAS se estructuraron siguiendo las Directrices para la Acuicultura Sostenible de la FAO (FAO, 2025), las cuales comprenden cuatro ejes fundamentales: (1) Gobernanza y planificación, (2) Uso sostenible de los recursos y gestión de ecosistemas y explotaciones, (3) Responsabilidad social, trabajo decente e igualdad de género, y (4) Cadenas de valor, acceso a los mercados y comercio.

Además, cada una de estas dimensiones se enriqueció con 13 estudios de caso, en los que expertos de distintos países y áreas temáticas compartieron experiencias particulares, aportando una visión más detallada y aplicada a cada sesión.

Durante el taller, se presentaron tanto los informes comisionados como los estudios de caso, lo que permitió identificar oportunidades y proponer acciones recomendadas para el desarrollo de la acuicultura de macroalgas en la región.

REFERENCIAS

- FAO. 2023a. *Reconocimiento y mejora de la contribución de las algas al desarrollo de la acuicultura mundial*. Documento de Discusión. 12.^a reunión del subcomité de Acuicultura, Hermosillo, México, 16–19 de mayo de 2023. Roma. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a90f2a9a-bf47-491c-ac00-1b3a8aa8b538/content>
- FAO. 2023b. *Informe de la 12.^a reunión del subcomité de Acuicultura, Hermosillo, México, 16–19 de mayo de 2023*. FAO, Informe de Pesca y Acuicultura No. 1414. Roma. <https://doi.org/10.4060/cc7093t>
- FAO. 2024. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024. La transformación azul en acción. Roma. <https://doi.org/10.4060/cd0683es>
- FAO. 2025. Directrices para la acuicultura sostenible. Roma. <https://doi.org/10.4060/cd3785es>

Informe del Taller

PREÁMBULO

Se estima que la población mundial alcanzará los 9 000 millones de personas en 2050, lo que supondrá un aumento significativo en la demanda de alimentos y productos de origen sostenible. Satisfacer estas necesidades representa un gran desafío, especialmente en lo que respecta a la producción de alimentos de manera sostenible y equitativa.

La acuicultura de macroalgas se perfila como una alternativa prometedora para aumentar la producción de recursos marinos sin recurrir a la expansión de la agricultura terrestre, la cual suele implicar la deforestación de bosques, la sobreexplotación de acuíferos, y un uso intensivo de fertilizantes y pesticidas.

A diferencia de las pesquerías, muchas de las cuales enfrentan distintos niveles de sobreexplotación y no pueden satisfacer la creciente demanda, la acuicultura de macroalgas permite la reproducción y domesticación de especies, desempeñando un papel clave tanto en la seguridad alimentaria como en la restauración de los ecosistemas marinos.

Entre las regiones con mayor potencial para diversificar y expandir la acuicultura de macroalgas, América Latina se destaca como una de las más prometedoras. Con más de 70 000 km de costas, incluyendo islas y canales. La región abarca diversas zonas biogeográficas marinas, lo que se traduce en una gran heterogeneidad de ecosistemas y una alta diversidad de especies de macroalgas.

Además, muchas comunidades costeras mantienen una relación ancestral con su maritorio, aprovechando las macroalgas tanto mediante la recolección como el cultivo. La riqueza de especies, en gran medida inexplorada, constituye una fuente de materias primas con aplicaciones contemporáneas (por ejemplo, ficocoloides) y potenciales usos futuros (por ejemplo, nutraceuticos, principios bioactivos), consolidando a la región como un territorio clave para la innovación en este sector.

Sin embargo, la expansión de la acuicultura de macroalgas en la región se enfrenta a diversas limitaciones que han dificultado su desarrollo. Para que su potencial pueda materializarse, es fundamental visibilizar tanto los desafíos como las oportunidades, de modo que gobiernos, organismos de desarrollo y la industria de cultivos de macroalgas puedan trabajar de manera conjunta en la creación de marcos normativos y políticas eficaces. Estas deben fomentar la innovación tecnológica y el crecimiento económico, promoviendo así una expansión sostenible del cultivo de macroalgas, alineada con los ODS.

OBJETIVOS Y ENFOQUE

El objetivo general del taller fue *“identificar y compartir estrategias y políticas nacionales que pueden respaldar el desarrollo de la acuicultura de algas marinas en el cumplimiento de los Objetivos declarados en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible”*. En particular, se puso el foco en su potencial para fortalecer la seguridad alimentaria, mejorar los medios de vida, generar ingresos y promover la restauración de los ecosistemas.

Objetivos específicos:

1. Intercambiar experiencias sobre el desarrollo y operación de la acuicultura de macroalgas.
2. Identificar oportunidades y formular recomendaciones para la expansión sostenible de la acuicultura de macroalgas.
3. Detectar brechas en las políticas nacionales y analizar cómo los marcos estratégicos y normativos pueden fortalecer el desarrollo de la acuicultura de macroalgas y la creación de capacidades.

4. Definir prioridades estratégicas que orienten el trabajo futuro de la FAO, los estados y gobiernos, y la industria, en el fortalecimiento y expansión sostenible de la acuicultura de macroalgas.

En relación con el primer objetivo, se compartieron las experiencias de 27 expertos invitados, lo que permitió obtener los resultados esperados.

En cuanto al segundo objetivo se identificaron oportunidades y recomendaciones en cada una de las seis sesiones del taller, las cuales se resumen a continuación en el informe. Además, se llevó a cabo una actividad final en la que se pidió a cada participante aportar un mensaje clave que resumiera su experiencia durante las seis sesiones, así como las acciones necesarias para alcanzarlas. El análisis de los 27 mensajes obtenidos se presenta al final de este informe (ver Apéndice 1).

Respecto al tercer objetivo, los informes comisionados fueron clave para identificar las principales brechas en políticas y estrategias para el desarrollo de la acuicultura de macroalgas, complementándose con las valiosas aportaciones del grupo de conferencistas y expertos de diversas áreas.

Finalmente, en relación con el cuarto objetivo, las principales prioridades para orientar el trabajo de la FAO, los estados y gobiernos, y la industria se obtuvieron a partir del análisis de los resultados de las sesiones y de los mensajes clave solicitados a cada participante del taller.

RECOMENDACIONES DEL TALLER

Tras las presentaciones y los debates iniciales sobre los diversos aspectos del cultivo de macroalgas, los participantes del taller identificaron las principales brechas y desafíos del sector. Posteriormente, definieron las áreas temáticas clave y las oportunidades para abordarlos, además de proponer acciones concretas para impulsar el desarrollo de la acuicultura de macroalgas en cada una de las seis sesiones del taller. A continuación, se presentan las conclusiones elaboradas por las y los expertos.

SESIÓN 1. La alimentación y los productos biotecnológicos derivados de macroalgas

Las macroalgas han sido un pilar fundamental en la dieta y la salud de las comunidades costeras del Pacífico Sur oriental durante más de 14 000 años. Sin embargo, en la actualidad, su consumo ha disminuido significativamente. A pesar de ello, siguen siendo una opción nutricional valiosa, desempeñando un papel clave como fuente de muchos micronutrientes, en particular yodo. La deficiencia de yodo afecta a más de 2 000 millones de personas en el mundo, y las macroalgas pueden contribuir a cubrir esta necesidad. No obstante, algunas variedades presentan concentraciones muy elevadas de este mineral, por lo que su consumo debe ser moderado para maximizar sus beneficios y minimizar riesgos, especialmente en nuevos grupos de consumidores, como personas veganas y vegetarianas, cuya presencia ha aumentado considerablemente en este siglo.

Es fundamental fomentar el consumo de macroalgas desde la infancia. Aunque los niños de entre 3 y 9 años pueden mostrarse más reacios a probar nuevos alimentos, es precisamente en esta etapa cuando las nuevas experiencias alimentarias pueden tener un impacto más duradero en su desarrollo.

En la sociedad actual, la pérdida de tradiciones alimentarias, en parte debido a la falta de tiempo para cocinar, ha contribuido al descenso del consumo de macroalgas en regiones donde anteriormente formaban parte habitual de la dieta. Recuperar su presencia en la alimentación podría aportar beneficios nutricionales y culturales significativos.

Sin embargo, uno de los principales usos de las macroalgas en la industria alimentaria reside en sus ficocoloides, compuestos que se emplean en una amplia variedad de aplicaciones tanto en alimentos procesados como en bebidas.

Por otro lado, algunas especies de macroalgas son fuentes de compuestos bioactivos únicos que pueden ser extraídos mediante procesos biotecnológicos, especialmente cuando se cultivan bajo condiciones estandarizadas que optimizan la producción, estabilidad y rendimiento de estos compuestos. Varios de estos compuestos presentan propiedades interesantes para la regulación metabólica y la suplementación de carencias alimentarias (particularmente de minerales y vitaminas), lo que los convierte en ingredientes funcionales con gran potencial para una alimentación saludable y una nutrición regenerativa. Aunque la identificación de estos bioactivos y el cultivo experimental de macroalgas están aún en fase de desarrollo, es crucial avanzar en su escalado y en el entrenamiento de los cultivadores para asegurar la producción sostenible de biomasa.

El cultivo de macroalgas, tanto para garantizar la seguridad y la soberanía alimentaria como para la producción de productos biotecnológicos, puede llevarse a cabo en pequeñas granjas acuícolas u otros modelos de cultivo. Para asegurar el éxito de estos proyectos, es fundamental definir claramente los productos finales que se desean obtener. Además, es importante que las macroalgas cultivadas en condiciones controladas y con medidas de bioseguridad cumplan con los estándares necesarios para su uso en alimentación o aplicaciones biotecnológicas. Las comunidades que suministren biomasa para la producción de productos biotecnológicos deben estar debidamente informadas y capacitadas sobre estos procesos. A diferencia de la confidencialidad que suele acompañar los procesos patentados por empresas privadas, en este caso se debería evitar la especulación, al menos dentro de un marco razonable.

Las oportunidades y recomendaciones formuladas por las y los expertos en esta sesión se resumen en el Cuadro 1.

CUADRO 1

Principales oportunidades y recomendaciones relacionadas con la alimentación y los productos biotecnológicos derivados de macroalgas en América Latina

Tema	Oportunidad	Recomendación
Macroalgas como fuentes de compuestos de alto valor agregado	Las macroalgas poseen propiedades excepcionales que las posicionan como alimentos funcionales y saludables. Gracias a su amplia diversidad de biomoléculas funcionales, tienen el potencial de ser sometidas a procesos de biorrefinería. Su diversidad en cuanto a orígenes evolutivos y hábitats marinos permite la obtención de una gran variedad de coproductos de alto valor, lo que amplía sus aplicaciones en múltiples industrias, como la alimentaria, farmacéutica y biotecnológica.	Para aprovechar todo su potencial, es fundamental promover la educación y la formación de capital humano altamente cualificado, cultivos diferenciados y diversificar los productos alimentarios y biotecnológicos derivados de las macroalgas. Asimismo, se hace necesario impulsar la investigación orientada al desarrollo de productos de alto valor añadido a partir de macroalgas, así como asegurar la transferencia de estos conocimientos al sector industrial.
Las macroalgas son una fuente de alimentación saludable	En algunos países de la región existe una tradición alimentaria basada en el consumo de macroalgas, reconocidas por sus beneficios para la salud humana y animal, especialmente por su contenido de elementos minerales esenciales en niveles óptimos.	Es fundamental fomentar la investigación sobre la caracterización y los efectos biológicos de los compuestos bioactivos presentes en las macroalgas nativas de la región, en particular en lo relativo a la salud humana. Estas macroalgas constituyen una fuente rica en proteínas, fibra, vitaminas (A, C, E, K y del complejo B) y minerales esenciales como calcio, hierro, magnesio y yodo, además de contener compuestos con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias. Asimismo, resulta prioritario desarrollar bases de datos accesibles que recopilen información detallada sobre la composición nutricional de las macroalgas producidas en diversos sectores, junto con los niveles de concentración de metales pesados y pesticidas, e indicando las concentraciones que podrían resultar perjudiciales para los consumidores. Esta información facilitaría la promoción de un consumo seguro, al tiempo que permitiría maximizar sus beneficios para la salud. Finalmente, se recomienda incentivar el consumo humano de macroalgas en aquellos donde su incorporación a la dieta aún no forma parte de la tradición alimentaria.

CUADRO 1 (CONTINUACIÓN)

Tema	Oportunidad	Recomendación
Macroalgas como un componente clave de la soberanía alimentaria local	Las macroalgas pueden desempeñar un papel clave en la soberanía y seguridad alimentaria de los países de América Latina.	Para potenciar su consumo directo en la región y hacerlas económicamente atractivas dentro de las dietas y gastronomías locales, es fundamental promover las tradiciones culinarias ancestrales, innovar en los formatos de presentación y reforzar la divulgación de sus beneficios nutricionales y culturales.

SESIÓN 2. Gobernanza y planificación normativa de la acuicultura de macroalgas

La mayoría de los países de la región cuentan con una regulación general para la acuicultura; sin embargo, es menos frecuente que estas normativas se enfoquen específicamente en el cultivo de macroalgas. Además, pocas de ellas se basan en el principio precautorio, lo que ha derivado en normativas más reactivas que proactivas. Dado que las macroalgas pueden aportar significativamente a la sostenibilidad ambiental, económica y social de las comunidades costeras, resulta fundamental que los gobiernos desarrollen planes estratégicos específicos para fortalecer esta actividad, reducir su vulnerabilidad y respaldarla con regulaciones adecuadas que fomenten su desarrollo sin restringir su crecimiento natural.

Por otra parte, los riesgos relacionados con la bioseguridad, como la introducción de enfermedades y plagas asociadas a los cultivos de algas, así como la proliferación de especies invasoras, suelen estar poco considerados en las normativas vigentes.

Asimismo, los permisos para la acuicultura de macroalgas deben diferenciarse de aquellos aplicables al cultivo de especies heterótrofas como moluscos, peces y crustáceos, dado los requerimientos ecológicos específicos de las macroalgas, tanto como recurso de producción primaria como por su rol en la provisión de refugios ambientales. Actualmente, los procedimientos para la obtención de permisos varían significativamente entre los países de la región. Por ejemplo, en el Ecuador, el proceso está centralizado en una ventanilla única, lo que facilita el inicio del cultivo una vez completada la documentación. En cambio, en Chile, el trámite involucra múltiples entidades estatales que operan sin una coordinación eficiente, lo que genera retrasos considerables y encarece el proceso. Estas diferencias en la gobernanza y planificación evidencian la variabilidad normativa a nivel regional y cómo, en ciertos países, la regulación puede convertirse en una barrera significativa para quienes buscan desarrollar la acuicultura de macroalgas.

Por último, la planificación espacial marina y costera es escasa o inexistente en la mayoría de los países de la región. Aunque se han desarrollado diversas herramientas de gobernanza y gestión marina, en la práctica los permisos se otorgan de forma aislada a cada solicitante (acuicultores, pescadores artesanales, agencias estatales, entre otros), sin una visión integrada. Esto ha generado un mosaico fragmentado de usos –que incluye áreas marinas protegidas, zonas de manejo pesquero, sitios de conservación de reproductores para la acuicultura de invertebrados y áreas de acuicultura artesanal o industrial– lo cual dificulta una gestión coherente y sostenible del borde costero. En este contexto, el desarrollo de la acuicultura de macroalgas se ve frecuentemente limitado por la competencia en la obtención de permisos y por conflictos con otros usuarios del espacio marino.

Las oportunidades y recomendaciones planteadas por las y los expertos en esta sesión se resumen en el Cuadro 2.

CUADRO 2

Principales oportunidades y recomendaciones relacionadas con la gobernanza y la planificación normativa de la acuicultura de macroalgas en América Latina

Tema	Oportunidad	Recomendación
Regulaciones y marcos normativos para el cultivo de macroalgas	Existen marcos regulatorios, tanto a nivel global como nacional, susceptibles de mejora, especialmente en lo que respecta al otorgamiento de permisos y licencias para la ocupación de espacios marino-costeros.	<p>Fortalecer y estandarizar las políticas públicas y los regímenes de planificación existentes, garantizando la convivencia armoniosa con otras actividades marítimas.</p> <p>Avanzar en el ordenamiento del borde costero por parte de los países, brindando mayor certeza para el desarrollo económico sostenible de las diversas actividades productivas que confluyen en el territorio.</p> <p>Establecer normativas claras para el uso de áreas marinas, así como para la concesión de permisos, licencias y derechos de uso a largo plazo, junto con certificaciones de calidad y estándares ambientales adaptados al cultivo de macroalgas.</p> <p>Revisar y adaptar los marcos regulatorios internacionales, especialmente en lo relativo a bioseguridad, certificaciones y manejo de especies exóticas, con el fin de fortalecer las políticas nacionales.</p>
Optimización de marcos regulatorios mediante estudios de casos locales	Existen casos locales en bioseguridad, impacto ambiental y planificación espacial que pueden servir como referencia para la construcción de un marco regulatorio sostenible.	Los países deben elaborar un diagnóstico de brechas que sirva como base para diseñar políticas sectoriales orientadas al desarrollo del cultivo de macroalgas. Este diagnóstico debe incluir planes y programas adaptados a las diversas realidades de cada país y, en aquellos casos donde la acuicultura de macroalgas esté aún en fases incipientes, debe complementarse con ejemplos de otras actividades acuícolas, tanto a nivel regional como global.
La introducción de nuevas especies como una alternativa viable para la acuicultura de macroalgas en la región	<p>Diversas especies de macroalgas asiáticas, que han demostrado ser exitosas en términos de producción y demanda, han sido importadas a varios países de América Latina y el Caribe.</p> <p>No obstante, existen especies nativas que podrían desempeñar un papel equivalente y que deberían ser consideradas como primera opción, siempre que cumplan los criterios de bioseguridad. Esto haría innecesaria la introducción de especies provenientes de otras regiones.</p>	Ajustar los marcos regulatorios de cada país para regular la introducción y el manejo de especies exóticas, basándose en los riesgos reales y potenciales documentados, y aplicando de forma efectiva al principio de precaución.
Interacción entre el cultivo y el medio ambiente	Las macroalgas, gracias a su capacidad para capturar CO ₂ , absorber metales pesados y producir biomasa a partir de nutrientes inorgánicos y luz solar, ofrecen una oportunidad única para desarrollar marcos de gobernanza ambientalmente responsables. Regular y gestionar su interacción con el entorno permite optimizar estos beneficios ecológicos, posicionando a las macroalgas como aliadas clave en las políticas de sostenibilidad y mitigación ambiental.	<p>Diseñar e implementar grupos de trabajo multidisciplinarios que incluyan a los sectores público, académico y privado, con el objetivo de realizar un análisis integral de la interacción entre las actividades costeras y el cultivo de macroalgas, aprovechando sus efectos beneficiosos sobre el medio ambiente.</p> <p>Promover prácticas de cultivo de macroalgas que optimicen sus externalidades positivas en términos de sostenibilidad ambiental. Establecer distinciones (a nivel reglamentario y productivo) entre los cultivos destinados a la seguridad alimentaria y aquellos enfocados en la mitigación de contaminantes ambientales u otros servicios ecosistémicos. Regular las prácticas de acuicultura de macroalgas para maximizar tanto su desarrollo como su sostenibilidad ambiental.</p>

CUADRO 2 (CONTINUACIÓN)

Tema	Oportunidad	Recomendación
Integración armoniosa de todos los usuarios del borde costero	Existen casos exitosos de integración entre distintas entidades del Estado para la tramitación de permisos de cultivo de manera transversal.	<p>Coordinar la gobernanza relacionada con la regulación, el fomento, la investigación y la innovación, estableciendo una alianza estratégica para cumplir con los objetivos derivados de la política sectorial. Incluir, en cada país, a las instituciones responsables de normar y supervisar las actividades en el borde costero, así como aquellas encargadas de sancionar el incumplimiento de las normativas, promoviendo la creación de una ventanilla única para la obtención de permisos de cultivo. Fortalecer las políticas públicas que impulsen cultivos experimentales de nuevas especies, así como la expansión de aquellos cultivos que ya han alcanzado un nivel de madurez tecnológica. Asegurar que la institucionalidad pública cuente con un sistema ágil, transparente y eficiente para el otorgamiento de permisos, facilitando el acceso a la actividad de acuicultura de macroalgas.</p> <p>Fortalecer la gobernanza mediante el impulso de acuerdos de manejo comunitario con diversos actores, involucrando no solo a pescadores y recolectores locales, sino también a organizaciones de la sociedad civil. A través de instrumentos de gestión local, estos acuerdos contribuirán a garantizar la sostenibilidad de la actividad, la conservación de las especies y la protección del entorno.</p>

SESIÓN 3. Gestión sostenible y aprovechamiento de los servicios ecosistémicos en los cultivos de macroalgas

Las macroalgas, que suelen ser algunas de las especies más abundantes en términos de cobertura y biomasa en ecosistemas marinos, desempeñan un papel crucial en la absorción de dióxido de carbono y otros nutrientes orgánicos e inorgánicos. Además, producen oxígeno soluble y materia orgánica, que se convierte en un componente clave del flujo de materia y energía hacia los niveles superiores de las tramas tróficas marinas. Más allá de estos beneficios, las macroalgas también ofrecen una amplia gama de servicios ecosistémicos adicionales. Pueden actuar como especies bioingenieras, proporcionando refugio frente a la depredación, zonas de anidamiento, protección contra la erosión y tormentas, y sustratos vitales para diversas especies. Muchos de estos roles ecológicos también se aplican a las macroalgas cultivadas, las cuales brindan valiosos servicios ecosistémicos.

En el contexto de la acuicultura multitrófica integrada (IMTA, del acrónimo en inglés Integrated Multitrophic Aquaculture), las macroalgas desempeñan un papel fundamental en la mejora de estos servicios, ya que ayudan a absorber nutrientes en exceso, como nitrógeno y fósforo, reduciendo la eutrofización y mejorando la calidad del agua. Al integrar especies de diferentes niveles tróficos, como peces, mariscos y macroalgas, se genera un sistema acuático más equilibrado y sostenible. Las macroalgas no solo contribuyen a la salud de los ecosistemas acuáticos, sino que también generan beneficios económicos, como la producción de biocombustibles, bioplásticos y alimentos, reforzando su importancia en un enfoque acuícola ecológicamente responsable.

Sin embargo, las macroalgas son comunidades biológicas vulnerables, especialmente ante la presión de la pesca, lo que ha impulsado el desarrollo de la acuicultura como una solución para proveer biomasa con menor impacto en los ambientes naturales donde habitan. Este cambio en la matriz productiva, que comenzó en Asia a mediados del siglo pasado, se encuentra actualmente en sus primeras etapas de transición

en América Latina. Aun así, el sector enfrenta diversos desafíos ambientales, tecnológicos, sociales y económicos que dificultan el desarrollo de la industria de las macroalgas en la región.

En términos generales, la acuicultura de macroalgas se considera como una de las prácticas de menor impacto ambiental dentro de la acuicultura de recursos marinos. Sin embargo, este bajo impacto sigue siendo poco reconocido en la percepción pública, lo que se traduce en marcos regulatorios limitados y legislaciones imprecisas para su normativización. Esta falta de reconocimiento ha facilitado una rápida diversificación de la acuicultura hacia el cultivo de macroalgas, pero también ha generado vacíos normativos que deben ser evaluados en función de las características específicas de cada cultivo y país de la región. Es crucial que las personas y organizaciones involucradas en los cultivos de macroalgas reconozcan su papel como proveedores de servicios ecosistémicos, y determinen cómo sus beneficios ambientales y ecológicos pueden y deben aprovecharse para impulsar el desarrollo socioeconómico local y regional.

En América Latina, los cultivos de macroalgas suelen ser monoespecíficos, compuestos mayoritariamente por especies de macroalgas rojas cultivadas mediante métodos vegetativos (es decir, utilizando tejido vegetativo como medio de propagación y crecimiento). Como resultado, estos cultivos pierden vitalidad con rapidez, y los propágulos o talos envejecidos tienden a presentar menores tasas de crecimiento, y una mayor susceptibilidad a enfermedades. Un caso particularmente relevante ha sido el aumento masivo y extendido de macroalgas verdes epífitas que afectan la producción comercial de *Gracilaria chilensis* en Chile, constituyendo el primer informe documentado de riesgos de bioseguridad para las macroalgas comerciales en la región. Por otro lado, en Chile, la proliferación de algas verdes filamentosas se ha interpretado como una oportunidad, ya que actualmente se desarrollan estudios para aprovechar su abundancia en aplicaciones como en la producción de bioplásticos.

Por otro lado, los cultivos de macroalgas en América Latina se desarrollan en cuerpos de agua que enfrentan diversos desafíos. Algunas áreas de cultivo están expuestas a contaminantes, especialmente metales pesados, lo que plantea la necesidad de evaluar una posible modificación del mercado, orientándolo hacia la biorremediación de metales pesados en lugar de la producción alimentaria. A estos se suman los efectos del cambio climático, que genera una variabilidad ambiental significativa en las zonas costeras (por ejemplo, en la temperatura y otros parámetros clave), afectando a los ciclos biológicos y, en consecuencia, a los rendimientos productivos según la localización de los cultivos.

Ante estas condiciones, algunos países han optado por introducir especies exóticas provenientes de Asia, como la mejor alternativa de cultivo, debido a su valor comercial, buen rendimiento y una demanda más consistente en un mercado más amplio y estable. Aunque las estrategias de diversificación acuícola se adoptan de manera local y soberana, es importante destacar que los riesgos asociados con la introducción de especies exóticas no se limitan a las fronteras nacionales, especialmente en los ecosistemas acuáticos. La introducción de especies, si no se lleva a cabo con las precauciones necesarias, puede conllevar amenazas relacionadas con la propagación de plagas y enfermedades, así como la introducción de genotipos o especies invasoras, cuyos efectos pueden tener importantes consecuencias ecológicas, ambientales, económicas y sociales. Las oportunidades y recomendaciones planteadas por las y los expertos en esta sesión se resumen en el Cuadro 3.

CUADRO 3
Principales oportunidades y recomendaciones relacionadas para la gestión sostenible y el aprovechamiento de los servicios ecosistémicos en los cultivos de macroalgas en América Latina

Tema	Oportunidad	Recomendación
Monitoreo ambiental y gestión de riesgos de bioseguridad	Se han identificado capacidades entre cultivadores y miembros de comunidades costeras para el monitoreo, la prevención y la detección de enfermedades.	Implementar programas de planificación espacial del océano costero que permitan seleccionar zonas de cultivo que optimicen la productividad y minimicen los riesgos a la bioseguridad. Asimismo, organizar programas de monitoreo ambiental, ecológico y epidemiológico en los cultivos.
Aprovechamiento de los servicios ecosistémicos	Existen estrategias de acuicultura multitrófica integrada (IMTA) y acuicultura restaurativa que buscan aumentar la rentabilidad de los cultivos.	Subvencionar la investigación científica y técnica para identificar, cuantificar y valorar los servicios ecosistémicos proporcionados por las macroalgas cultivadas (o con potencial de cultivo). Fomentar programas de capacitación en conceptos y técnicas de cultivo integrado o regenerativo. Promover prácticas de cultivo de macroalgas orientadas a la mitigación y a la provisión de otros servicios ecosistémicos.
Cambio climático y su influencia en el cultivo	En algunas regiones, las condiciones resultantes del cambio climático pueden favorecer la productividad de los cultivos de macroalgas, como ocurre con el aumento de las surgencias en el Pacífico Suroriental. Sin embargo, en otras zonas, fenómenos como las olas de calor podrían comprometer la viabilidad de su cultivo sostenible. Además, las macroalgas ofrecen una solución integral frente al cambio climático: capturan carbono, contribuyen a mitigar el calentamiento global, mejoran la salud de los ecosistemas marinos, ayudan a reducir las emisiones de metano del ganado y pueden utilizarse para la producción de biocombustibles.	Evaluar y proyectar las variaciones en la productividad y los impactos del cambio climático sobre el cultivo de macroalgas.
Impacto ambiental	Se espera que el cultivo de macroalgas tenga un menor impacto ambiental en comparación con los cultivos animales u otras actividades que utilizan el borde costero.	Determinar el impacto ambiental de los diferentes sistemas de cultivo y escalas de producción de macroalgas. Establecer una estructura institucional que garantice el acceso a información oportuna y de calidad para respaldar la toma de decisiones, la implementación de estrategias de resiliencia y la evaluación de políticas. Además, investigar los posibles beneficios y riesgos ambientales y socioeconómicos antes de incrementar la producción en los cultivos. Fomentar políticas de incentivos para proyectos de cultivo de macroalgas con impacto ambiental positivo y promover su inclusión en estrategias de carbono azul.
El cultivo de macroalgas como parte de una bioeconomía circular	La cadena de valor de las macroalgas y sus coproductos asociados brinda una oportunidad para aprovechar casi toda su biomasa.	Fomentar el desarrollo de tecnologías de transformación de biomasa, como las biorrefinerías, que maximicen el aprovechamiento de sus diferentes componentes y minimicen los residuos, siguiendo los principios de la economía circular.
Introducción de especies exóticas en el cultivo	En algunos países de la región se ha logrado cerrar el ciclo biológico para el cultivo de diversas especies locales, evitando así las amenazas asociadas a la introducción de especies exóticas.	Monitorear, controlar y reportar los riesgos de bioseguridad asociados con la introducción de especies exóticas de macroalgas, incluyendo la evaluación del grado de amenaza de especies invasoras. Establecer normas y estrategias que prioricen el cultivo de especies nativas, siempre que existan alternativas locales a las especies introducidas.

SESIÓN 4. Perspectiva técnica de las tecnologías de cultivo de macroalgas

A pesar del consumo ancestral de macroalgas en algunas regiones y su explotación histórica, la acuicultura de macroalgas en América Latina continúa siendo incipiente y de bajo volumen. Sin embargo, para la mayoría de las especies comerciales ya existen tecnologías de cultivo desarrolladas, al menos a nivel experimental, que permiten cerrar el ciclo productivo desde etapas tempranas hasta obtener macroalgas de tamaño comercial. Actualmente, son pocas las especies que se cultivan a escala comercial, con algunas excepciones notables como *Gracilaria chilensis* en Chile y la especie asiática *Kappaphycus alvarezii* en el Brasil, el Ecuador y la República Bolivariana de Venezuela.

Las tecnologías de cultivo de macroalgas en la región son diversas, aunque en su mayoría rudimentarias, desarrollándose principalmente en comunidades costeras, lo que fomenta la acuicultura de pequeña escala (APE). Esto ofrece a las comunidades una mayor capacidad para asumir la responsabilidad del patrimonio genético de las especies que cultivan. Sin embargo, las tecnologías utilizadas por acuicultores con recursos limitados están enfocadas, principalmente, en la venta de materia prima a empresas transformadoras, dentro de un mercado global complejo, en el que los precios pueden fluctuar debido a factores como la oferta y demanda o las condiciones climáticas. Esta situación puede generar incertidumbre comercial a la que los pequeños productores deben hacer frente.

La incorporación de desarrollo tecnológico en los cultivos debe evaluarse con el fin de:

1. Incrementar la producción y el rendimiento de nuevos productos con valor agregado.
2. Transferir medidas de bioseguridad que garanticen la salud de las especies cultivadas.
3. Asegurar la inocuidad alimentaria de la biomasa producida en los cultivos, contribuyendo así a la seguridad alimentaria.

Todo este desarrollo tecnológico debe implementarse a medio plazo en estas comunidades costeras para asegurar la sostenibilidad de las producciones basadas en la APE, con especial énfasis en los dos últimos puntos cuando los cultivos se fundamentan en especies exóticas.

El desarrollo tecnológico incluye métodos para seleccionar un *stock* inicial de siembra y estrategias de manejo reproductivo, que afectan la diversidad genética de las poblaciones cultivadas. En diversas especies ya se han observado etapas incipientes de domesticación, por lo que resulta crucial evaluar y optimizar las estrategias de manejo de los recursos genéticos para garantizar un mejoramiento sostenible a largo plazo de la calidad de los tipos cultivados.

Una herramienta transversal de gran interés es el *Plan de Acción Mundial de los Recursos Genéticos y Acuícolas* de la FAO, que ofrece una vía para lograr una producción sostenible mediante la identificación y categorización de inventarios de recursos algales por parte de los productores. Este plan de acción puede ser clave en la promoción de la conservación y el uso sostenible de especies nativas, en la mejora de la gobernanza y en el fomento de la innovación en productos de alto valor. Además, respalda la capacitación de las comunidades costeras y la cooperación internacional, impulsando así la producción sostenible y competitiva de macroalgas en los mercados globales. Las oportunidades y recomendaciones discutidas por las y los expertos en esta sesión se detallan en el Cuadro 4.

CUADRO 4
Principales oportunidades y recomendaciones desde la perspectiva técnica de las tecnologías de cultivo de macroalgas en América Latina

Tema	Oportunidad	Recomendación
Técnicas de cultivo	Existen aspectos técnicos e infraestructuras simples disponibles para la transferencia y el escalado de tecnologías aplicables a especies de importancia comercial.	Incrementar el nivel de tecnificación en los cultivos, implementando sistemas con mayor autonomía, menor uso de espacio y costos reducidos de instalación y operación en las granjas marinas. Establecer, según la realidad de cada país, las técnicas más apropiadas para el cultivo de macroalgas, que permitan aumentar la escala de producción y mejorar los rendimientos.
Diversidad de macroalgas	<p>Existe una amplia diversidad de macroalgas nativas y técnicas de cultivo, muchas de las cuales ya han sido evaluadas en términos de viabilidad técnica.</p> <p>Por otro lado, las especies exóticas han desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de la industria en el Brasil y en la República Bolivariana de Venezuela gracias a su alta demanda comercial y a la existencia de una cadena de valor bien consolidada. Por ello, es fundamental considerar estas especies introducidas como parte de los recursos genéticos disponibles para fortalecer y consolidar la maricultura en estos países.</p>	Diversificar la oferta para escalar el negocio de las macroalgas, basándose en la pirámide de valor, con un enfoque especial en mejorar la seguridad alimentaria. Identificar y validar el potencial de cultivo de especies nativas o exóticas (<i>Kappaphykus</i> spp.) de macroalgas en los países de América Latina.
Tecnología e innovación	Oportunidad de desarrollar nuevas tecnologías tanto para los cultivos como para los productos derivados de las macroalgas.	Fomentar la innovación tecnológica para diversificar los productos derivados de las macroalgas. Diseñar estrategias de cultivo y técnicas de procesamiento poscosecha que favorezcan la acumulación de biomoléculas de interés en las macroalgas. Crear e implementar paquetes tecnológicos orientados al desarrollo de productos con valor añadido a partir de algas marinas.
Bioteología	La implementación de bioteología y la optimización de los métodos de cultivo pueden incrementar tanto la productividad como la resiliencia frente a cambios ambientales.	Invertir en investigación científica, establecer colaboraciones con universidades y centros de innovación, y fomentar el uso de bioteología en los procesos de producción y procesamiento.
Inteligencia artificial	Las diversas aplicaciones de la inteligencia artificial permiten monitorear el entorno de cultivo, facilitando la toma de medidas oportunas. Además, posibilitan la evaluación de las macroalgas cosechadas, especialmente en lo relativo a la detección de impurezas y contaminantes, entre otras innovaciones revolucionarias.	Explorar las aplicaciones de la inteligencia artificial en el monitoreo y la optimización de los procesos productivos. Fortalecer y acelerar la capacitación de los cultivadores para afrontar los desafíos derivados a la incorporación de nuevas herramientas tecnológicas.
Plan de acción mundial para la conservación, la utilización sostenible y el desarrollo de los recursos genéticos acuáticos para la alimentación y la agricultura (https://doi.org/10.4060/cb9905es)	Existe un plan de acción mundial que promueve la gestión de los recursos genéticos, incluida la acuicultura de macroalgas, con el objetivo de mejorar la calidad de las especies cultivadas y facilitar la creación de marcos regulatorios que garanticen su sostenibilidad. Sin embargo, en la región persisten condiciones limitadas debido a la falta de conocimiento en manejo genético, la dependencia de "semillas" silvestres y la escasez de marcos regulatorios que protejan el patrimonio genético y fomenten la innovación en el mejoramiento genético.	<p>Desarrollar las capacidades necesarias en términos de infraestructura, equipamiento y capacitación de personal, para garantizar la preservación de los recursos genéticos acuáticos de interés en colecciones de referencia, así como la provisión sistemática de semillas o plántulas de calidad para los cultivos de algas marinas. Implementar marcos regulatorios que protejan la propiedad intelectual asociada a la creación de cepas mejoradas y al patrimonio genético local.</p> <p>Poner en marcha sistemas de trazabilidad genética y sanitaria que aseguren la calidad, seguridad y sostenibilidad de los cultivos de macroalgas. Esto implica el registro y monitoreo de las cepas utilizadas, así como la aplicación de protocolos de bioseguridad validados para la prevención de enfermedades.</p>

CUADRO 4 (CONTINUACIÓN)

Tema	Oportunidad	Recomendación
Recurso humano parcialmente existente	Existen comunidades costeras que, bajo las condiciones adecuadas, podrían transformar su matriz productiva. Estas comunidades poseen un valioso conocimiento ancestral y una profunda conexión con el mar. Las tecnologías de acuicultura de pequeña escala (APE) son implementadas por alqueros con recursos limitados y formación escolar básica.	Realizar un análisis crítico de la participación de los diferentes actores en la cadena de valor, con el fin de identificar oportunidades de mejora en el acceso a las rentas generadas por la actividad del cultivo de macroalgas, validándola como una práctica que contribuye al bienestar de las comunidades involucradas. Diseñar e implementar programas de formación de capital humano para el cultivo de macroalgas, que optimicen las tecnologías existentes y apliquen medidas de bioseguridad.

SESIÓN 5. Responsabilidad social, el trabajo digno, la inclusión de la juventud y la igualdad de género en el cultivo de macroalgas

Se espera que el desarrollo de la acuicultura de macroalgas no solo beneficie a los acuicultores, sino también a las comunidades costeras donde se lleva a cabo la actividad.

A diferencia de las actividades pesqueras tradicionales, la explotación de macroalgas ha sido históricamente liderada por mujeres en muchas regiones del mundo. Con la diversificación acuícola, que involucra a actores que inicialmente eran recolectores de macroalgas, el cultivo de macroalgas representa una oportunidad significativa para integrar a más mujeres en actividades productivas dentro de las comunidades costeras y rurales de América Latina, áreas históricamente marcadas por estructuras patriarcales. Esta actividad no solo promueve la equidad de género al generar ingresos y trabajo decente a las mujeres, sino que también contribuye a mejorar la calidad de vida de toda la comunidad, especialmente cuando se acompaña de una capacitación adecuada.

El cultivo comunitario de macroalgas, llevado a cabo a través de asociaciones como sindicatos, federaciones y cooperativas, y con niveles tecnológicos adecuados orientados hacia productos de alto valor, puede ayudar a frenar la migración de los jóvenes hacia las ciudades, promoviendo el crecimiento económico y el desarrollo local. Las comunidades, que a menudo cuentan con conocimientos tradicionales sobre las macroalgas, pueden beneficiarse de una combinación de tecnologías desarrolladas en universidades e institutos de investigación, así como de programas de capacitación y transferencia de conocimientos gestionados por organismos estatales o centros educativos, y acceso a financiación a corto y mediano plazo. Esta integración cultural en el cultivo es esencial para el desarrollo sostenible de la acuicultura de macroalgas. Lograr una sinergia entre comunidades, centros de investigación y gobiernos es crucial para el éxito de la industria en los distintos países de la región. El resumen de las oportunidades y recomendaciones planteadas por las y los expertos en esta sesión se presenta en el Cuadro 5.

CUADRO 5

Principales oportunidades y recomendaciones relacionadas con la responsabilidad social, el trabajo digno, la inclusión de la juventud y la igualdad de género en el cultivo de macroalgas en América Latina

Tema	Oportunidad	Recomendación
Igualdad de género	El cultivo de macroalgas representa una oportunidad clave para integrar a más mujeres en actividades productivas.	Fomentar la capacitación de las mujeres en el cultivo de macroalgas para fortalecer la cohesión familiar y social en las comunidades costeras, a través de proyectos que generen oportunidades comerciales, ofrezcan empleo digno y contribuyan a prevenir la migración hacia las ciudades.
Capital humano con experiencia limitada y formación escasa en acuicultura de macroalgas	El conocimiento ancestral promueve el uso de las macroalgas, tanto mediante su recolección como a través de su cultivo, para la subsistencia, aprovechando sus propiedades alimentarias y terapéuticas, así como para su comercialización a terceros interesados en los ficocoloides.	Crear espacios educativos y programas de capacitación que ofrezcan una formación integral a los futuros acuicultores, integrando y valorando los conocimientos tradicionales, y fomentando habilidades para interactuar de manera efectiva con los actores clave.

CUADRO 5 (CONTINUACIÓN)

Tema	Oportunidad	Recomendación
Brechas sociales	Existen comunidades costeras que ya cuentan con estructuras y liderazgos propios, los cuales pueden servir como base para reducir las brechas existentes.	Promover mayor equidad social en comunidades costeras vinculadas al cultivo de macroalgas, que a menudo presentan estructuras altamente jerarquizadas y presentar sesgos de género y edad. Fortalecer las habilidades existentes, como la cohesión social, el liderazgo comunitario y la confianza en el trabajo asociativo. Promover la recopilación de información social sobre recolectores y productores de algas a nivel nacional y regional, desagregada por género, origen étnico (Programa de Promoción de Oportunidades) y rango etario.
Incorporación de comunidades costeras en las actividades de cultivo de macroalgas	Existe capital humano dispuesto a participar en una transformación productiva que promueva el trabajo decente.	Identificar los ejes de interés productivo de los miembros de las comunidades costeras, consensuando los impactos de la actividad acuícola (por ejemplo, el uso del maritorio, la contaminación, entre otros) en sus localidades.
Oportunidades de negocio para comunidades locales	El cultivo de macroalgas puede convertirse en una nueva fuente de ingresos y oportunidades comerciales, principalmente gracias a su amplia diversidad de usos.	Incentivar en los países la generación de ideas de proyectos y el diseño de instrumentos de financiación, tanto públicos como privados, para desarrollar y diversificar la cadena de valor de la acuicultura de macroalgas. Evaluar y autoevaluar a los actores involucrados en las distintas etapas de la cadena de valor, desde la producción de macroalgas hasta sus subproductos o coproductos.
Capacitación de comunidades costeras	El empleo sostenible y el fortalecimiento de las comunidades costeras pueden promoverse a través de la capacitación en modelos de negocio inclusivos.	Capacitar a pescadores, pescadoras y emprendedores en modelos de negocio, y facilitarles el acceso a financiamiento y mercados.

SESIÓN 6. Cadenas de valor, acceso a mercados y comercio

El panorama global refleja una creciente diversificación en los mercados de productos derivados de macroalgas, lo que está impulsando la creación de nuevas cadenas de valor. América Latina cuenta con un potencial significativo en la generación de coproductos y subproductos, aún poco explorado en comparación con otras regiones del mundo. Sin embargo, para que la acuicultura de macroalgas sea económicamente sostenible, debe trascender el nivel de subsistencia de las comunidades que la practican. Esto requiere el cultivo de especies de mayor valor comercial, respaldado por tecnologías adecuadas y una orientación hacia mercados estratégicos con capacidad y acceso tecnológico. Además, los servicios ecosistémicos y los beneficios ambientales y ecológicos asociados a estos cultivos podrían traducirse en oportunidades económicas tanto a nivel local como regional, fortaleciendo su viabilidad y sostenibilidad.

El desarrollo de tecnología y conocimiento resulta fundamental para garantizar la sostenibilidad económica de estos cultivos y fortalecer las economías rurales y costeras. Para que las comunidades involucradas logren una transferencia efectiva de tecnologías y una comprensión profunda de los mercados, es crucial contar con apoyo económico estatal. Este respaldo permitirá escalar las tecnologías desde sus fases experimentales hasta niveles comerciales, asegurando así la viabilidad y el crecimiento del sector.

Asimismo, es fundamental impulsar la investigación y el desarrollo para aprovechar el potencial de las especies locales y fomentar su cultivo. El Cuadro 6 presenta un resumen de las principales oportunidades y recomendaciones destacadas por las y los expertos en esta sesión.

CUADRO 6
Principales oportunidades y recomendaciones para el desarrollo de cadenas de valor, acceso a mercados y comercio en el cultivo de macroalgas en América Latina

Tema	Oportunidad	Recomendación
Demanda presente a nivel regional y mundial	Existe una demanda actual y futura de macroalgas y sus subproductos, que trasciende el mero aporte social de subsistencia para las comunidades dedicadas a la acuicultura.	Analizar y cuantificar la demanda actual y futura de las macroalgas cultivadas y de sus posibles aplicaciones o subproductos a nivel local, regional y global. Estudiar la dinámica de los mercados para orientar el desarrollo hacia las necesidades de los consumidores, tanto locales como internacionales, generando así condiciones que favorezcan la sostenibilidad de los negocios.
Amplia variedad de aplicaciones y especies de macroalgas subutilizadas	Se registra un crecimiento en las aplicaciones de especies algales poco explotadas, tanto en su cultivo como en la bioprospección de compuestos bioactivos.	Invertir en Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) para ampliar el conocimiento generado en universidades y centros de investigación, fortalecer la madurez tecnológica y facilitar su transferencia. Los países deben redoblar esfuerzos para estrechar la vinculación entre el ámbito académico y el sector privado, promoviendo la innovación tecnológica. Además, es clave incentivar a la industria en el desarrollo y comercialización de coproductos de alto valor, lo que contribuirá a una industria sostenible y a la formación de capital humano preparado para enfrentar los diversos desafíos de la acuicultura de macroalgas.
Aparición de nuevos enfoques de valorización	Las macroalgas y sus coproductos representan una oportunidad para un aprovechamiento sostenible de las zonas costeras, permitiendo la coexistencia equilibrada de diversas actividades. Su cultivo, además de tener un impacto ambiental significativamente menor que otros sistemas de producción, puede potenciar el valor ecológico de estas áreas, aumentando su atractivo para aquellos mercados que priorizan la sostenibilidad. Esto, a su vez, impulsa la rentabilidad de sectores que buscan alternativas más responsables con el medioambiente.	Identificar y evaluar económicamente nuevos enfoques de valorización, como la acuicultura restaurativa y los sistemas multitrofos integrados (IMTA), que complementen el cultivo de macroalgas. Además, es fundamental impulsar la innovación y el desarrollo tecnológico para optimizar procesos productivos y crear productos de mayor valor, ampliando así las opciones para los consumidores y facilitando la apertura a nuevos mercados de exportación.
Nuevas estrategias de marketing para promover el uso y consumo de macroalgas	Las macroalgas tienen diversas aplicaciones, siendo una fuente de alta calidad de nutrientes esenciales. Gracias al auge de las redes sociales y las herramientas tecnológicas, es posible difundir en tiempo real los beneficios de su uso y consumo en la sociedad.	Generar información accesible sobre los beneficios de las macroalgas para la salud (como ingredientes funcionales) y para la alimentación humana (en complementos alimentarios, consumo directo y cocina gourmet), con el fin de llegar a todos los grupos etarios y sociales de la sociedad latinoamericana. Esto fomentará su consumo directo o indirecto (a través de ingredientes funcionales para una alimentación saludable). Además, fortalecer la presencia de los productos derivados de macroalgas en los mercados locales de consumo de cada país y en los mercados globales.
Aparición de nuevos nichos de mercado basados en macroalgas	El panorama mundial revela una creciente diversificación de los nichos de mercado para productos derivados de las macroalgas, lo que da lugar a nuevas cadenas de valor para su cultivo. Existe una demanda en aumento de macroalgas para la industria alimentaria, farmacéutica, cosmética y bioenergética.	Identificar nuevos nichos de mercados para los productos derivados de macroalgas cultivadas. Además, desarrollar otras especies presentes en la región que tengan potencial para abastecer estos mercados emergentes. Desarrollar cadenas de valor eficientes y fomentar la inversión en investigación y desarrollo para diversificar los productos derivados.

PASOS PARA ACCIONES MÁS AMPLIAS

Está claro que, para satisfacer la creciente demanda de alimentos provenientes del mar y garantizar la seguridad alimentaria en el futuro, será necesario aumentar la producción acuícola. En este contexto, la acuicultura de macroalgas se perfila como una opción estratégica y sostenible para abordar esta necesidad. Es crucial que los gobiernos y todas las partes interesadas, incluidos los sectores privados, académicos y sociales, cuenten con información detallada sobre el enorme valor potencial de esta práctica. La acuicultura de macroalgas no solo puede contribuir a la alimentación humana, sino también al desarrollo económico, la protección del medio ambiente y la creación de empleos en comunidades costeras. Por tanto, resulta vital sensibilizar a todos los actores clave sobre sus beneficios y fomentar políticas y acciones que promuevan su expansión y sostenibilidad en el futuro. Las acciones específicas recomendadas por los participantes del taller son las siguientes:

Acciones transversales en las seis áreas temáticas para ser lideradas por la FAO

- Apoyar la creación de una plataforma internacional de las Naciones Unidas sobre macroalgas, con la participación de expertos de alto nivel mundial.
- Brindar apoyo a los países de la región que lo requieran, para:
 - Elaborar planes estratégicos para el desarrollo de la acuicultura de macroalgas, así como revisar políticas y normativas que fomenten esta actividad productiva.
 - Capacitar y formar capital humano especializado en aspectos regulatorios, técnicas de cultivo y desarrollo de productos, con el objetivo de mejorar continuamente la calidad de la biomasa producida, aumentar su valor en el uso y transformación, y garantizar la sostenibilidad del cultivo de macroalgas.
 - Desarrollar e implementar estrategias y programas para promover el consumo humano de macroalgas, destacando sus beneficios para la salud y la seguridad alimentaria.
- Generar información de mercados útil para las comunidades productoras y optimizar la planificación de la producción con distintas especies, alineándola con los mercados objetivo. Para ello, se promoverán acciones como:
 - Orientar a los países en el diseño de cadenas de valor que ofrezcan a los consumidores productos con valor agregado, mejorando así las rentas de los distintos actores del sector.
 - Facilitar la cooperación e intercambio entre los países de la región en materia de tecnología y sistemas de cultivo de macroalgas. Esto incluirá iniciativas como: (i) Fomentar la colaboración entre la FAO, la República de Corea, el Banco Mundial, Chile y el Perú, junto con el sector privado; (ii) Promover un Foro de Inversión para el cultivo de macroalgas en América Latina y (iii) Explorar oportunidades de financiamiento a través del Fondo para el Medio Ambiente Mundial.
- Fomentar la optimización de los cultivos para maximizar la valorización del producto de las macroalgas y sus beneficios para la salud humana, los ecosistemas, y el desarrollo sostenible. Esto debe hacerse garantizando la prevención de riesgos de bioseguridad, promoviendo la inocuidad alimentaria y destacando la relevancia ambiental dentro de los sistemas actuales. Estos aspectos deben integrarse de manera urgente y acelerada para:
 - Promover el cultivo de macroalgas como una iniciativa transversal de la FAO en áreas clave como seguridad alimentaria, cambio climático y biodiversidad (por ejemplo, restauración ecológica, reducción de emisiones de metano en la ganadería y desarrollo de fertilizantes para la agricultura). Explorar sinergias con el Global Methane Hub (<https://www.globalmethanehub.org/>) y fomentar la bioeconomía para la alimentación y la agricultura sostenibles con un enfoque particular en la bioeconomía circular.

- Apoyar a las comunidades costeras, especialmente a mujeres, jóvenes y pueblos originarios que trabajan en la pesca artesanal para emprender y consolidar proyectos locales sostenibles de acuicultura de pequeña escala (APE) de macroalgas, así como de repoblamiento.
- Fomentar la colaboración regional para desarrollar e implementar una estrategia de comunicación y capacitación que promueva la acuicultura sostenible de macroalgas en América Latina, dirigida a todos los niveles de tomadores de decisión, técnicos, y comunidades costeras.
- Crear una base de datos que compile las legislaciones e información social de los países de la región, incluyendo experiencias de cultivo de macroalgas y su evaluación de desempeño, así como estudios de caso sobre las interacciones entre cultivo, ambiente y bioseguridad. Esto permitirá a cada país determinar la estructura de políticas que regularán su acuicultura local de macroalgas. Además, se promoverá el intercambio de experiencias y conocimientos entre los países de la región para el desarrollo de políticas y técnicas sostenibles en el cultivo de macroalgas.

Acciones transversales en las seis áreas temáticas que deben ser lideradas por los estados y gobiernos marino-costeros

- Evaluar, a nivel nacional, el estado de las especies de macroalgas en cultivo, considerando los espacios disponibles para su desarrollo. Además, con el objetivo de aprovechar los servicios ecosistémicos que ofrecen, se propone evaluar y desarrollar acuicultura multitrófica integrada (IMTA) o acuicultura basada en los principios de la acuicultura regenerativa.
- Fortalecer los marcos regulatorios nacionales para el desarrollo sostenible de la acuicultura, promoviendo buenas prácticas y legislaciones que prevengan y mitiguen los riesgos de bioseguridad, así como los impactos ambientales. Esto puede reforzarse mediante una regulación eficiente del tráfico de especies hidrobiológicas entre países.
- Dirigir la inversión estatal no solo al alivio de la pobreza, sino también a la modernización de las capacidades humanas y tecnológicas que optimicen la sostenibilidad, los servicios ecosistémicos y las condiciones específicas para el cultivo de macroalgas, con el objetivo de extraer productos de alto valor.
- Liderar programas de capacitación a nivel estatal para las comunidades costeras susceptibles de incorporarse al cultivo de macroalgas a pequeña escala (APE), o que ya estén realizando este tipo de cultivo. Estos programas deben ser implementados por equipos actualizados en aspectos ambientales, tecnológicos, sociales y económicos.
- Desarrollar una planificación nacional específica para cada país, que contemple un catastro de las especies de macroalgas nativas e introducidas, identificando: (i) avances en su desarrollo tecnológico de cultivo, (ii) los productos finales derivados de la biomasa, (iii) los requerimientos específicos para obtener cada uno de los productos potenciales de cada especie, y (iv) las ubicaciones disponibles en el borde costero para cada especie de cultivo. En el caso de que no haya especies disponibles, y que se justifique la introducción de especies exóticas, se deberán establecer medidas de bioseguridad para su admisión.
- Financiar, a nivel estatal, iniciativas de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) tecnológica relacionadas con estos productos, considerando no solo los procesos de obtención de bioactivos, sino también la continuidad en la capacitación y la financiación de cultivos sostenibles por parte de comunidades costeras que produzcan estos coproductos de manera responsable.

Acciones transversales en diversas temáticas que deben ser lideradas por la industria alguera, tanto artesanal como industrial

- Fomentar la participación activa y la toma de decisiones de las comunidades costeras en el desarrollo de la acuicultura sostenible de macroalgas, integrando su conocimiento tradicional sin ahondar en diferencias culturales históricas. Esto implica fortalecer las capacidades locales, facilitando la transición desde modelos asistencialistas hacia esquemas de autogestión comunitaria.
- Fortalecer alianzas estratégicas con actores de la sociedad civil presentes en los territorios, de manera que puedan acompañar, de forma conjunta, los procesos de transformación de las organizaciones y sus actividades, contribuyendo así al fortalecimiento de la gobernanza local.
- Evaluar la capacidad y el potencial de consumo de macroalgas y sus coproductos a nivel regional y global, para respaldar una producción destinada a la alimentación saludable y la nutrición regenerativa, demostrando su posible contribución a la soberanía y seguridad alimentaria.
- Promover el desarrollo de productos de mayor valor añadido, con el objetivo de fortalecer la producción de algas, impulsar la innovación, diversificar la oferta de productos y facilitar su expansión hacia nuevos mercados.

MENSAJES DE FUERZA Y ACCIONES PARA LOGRARLO

En el marco del Taller ACUIALGAS, se solicitó a cada participante que compartiera un mensaje de fuerza y una acción para lograrlo. Tras analizar los 27 mensajes recopilados, y a partir de la identificación de conceptos clave, se destacaron ocho temas recurrentes que reflejan las prioridades compartidas por los expertos:

1. Garantizar la sostenibilidad ambiental, económica y social.
2. Beneficiar a las comunidades locales y costeras.
3. Promover una matriz diversificada de especies nativas, así como de sus productos y derivados.
4. Identificar y acceder a mercados con alto potencial de crecimiento.
5. Proveer a la población de alimentos saludables a base de macroalgas y sus coproductos.
6. Fomentar una distribución equitativa del desarrollo económico en la sociedad.
7. Enfocar la producción en productos funcionales con valor añadido.
8. Impulsar la generación de empleos dignos.

El resumen de los ocho aspectos clave del cultivo de macroalgas, identificados a través de los mensajes de fuerza y las acciones propuestas por los participantes del Taller ACUIALGAS, se presenta en el Cuadro 7. Las propuestas individuales de cada uno de los 27 participantes se detallan en el **Apéndice 1** de este informe.

CUADRO 7

Resumen de los ocho aspectos clave del cultivo de macroalgas, identificados en los mensajes de fuerza y las acciones propuestas por los participantes del Taller ACUIALGAS

Mensajes de fuerza	Plan de acciones para lograrlo
1 Garantizar la sostenibilidad ambiental, económica y social	Implementar y coordinar conocimientos, buenas prácticas y la colaboración entre todos los actores de la cadena de valor. Este proceso debe realizarse con un enfoque que respete y proteja los ecosistemas donde se cultiva, promoviendo la diversificación y el fortalecimiento económico de las comunidades. Asimismo, debe favorecer un desarrollo social equitativo dentro de la estructura comunitaria que respalda las actividades de cultivo, extracción de subproductos y comercialización.
2 Beneficiar a las comunidades locales y costeras	Fortalecer los programas de cultivo de macroalgas en comunidades costeras que las recolectan, utilizan o cultivan, mediante proyectos de bajo costo y alta viabilidad económica. Estos programas deben contemplar el registro de productos derivados de la biomasa algal, la recopilación de información social, así como la capacitación en bioseguridad, buenas prácticas y metodologías para diversificar sistemas y especies de cultivo. La financiación debe provenir de gobiernos, instituciones académicas, organismos internacionales o a través de cooperación transregional. Asimismo, es fundamental impulsar la educación y formación de comunidades, productores y actores clave en buenas prácticas acuícolas, gestión ambiental y comercialización. Esto garantizará la integración de conocimientos tradicionales y científicos, fortaleciendo la sostenibilidad y el desarrollo del sector.
3 Promover una matriz diversificada de especies nativas y sus productos derivados	Diversificar las especies nativas de cultivo, los productos derivados de ellas y los mercados tanto tradicionales como emergentes, mediante la colaboración entre la comunidad, la industria, el gobierno y la academia. Esta colaboración debe enfocarse en fomentar la diversificación a nivel local, respetando el medio ambiente, promoviendo la innovación tecnológica e implementando programas de financiamiento y capacitación que fortalezcan a los emprendedores, aporten estabilidad a largo plazo a los cultivadores y favorezcan la transferencia de metodologías modernas y eficientes. Asimismo, debe impulsarse la aplicación de buenas prácticas que garanticen la bioseguridad y la trazabilidad de los productos.
4 Identificar y acceder a mercados con alto potencial de crecimiento	Innovar y emprender para aportar valor añadido y diversificar los productos derivados de las macroalgas cultivadas, generando indicadores que permitan avanzar con calidad hacia la cobertura de nichos de mercado, tanto tradicionales como emergentes. Fomentar el trabajo de equipos transdisciplinarios para maximizar el valor y generar efectos positivos en las comunidades que cultivan macroalgas. Desarrollar proyectos de bajo costo y viabilidad financiera que consoliden la diversidad a diferentes niveles de la cadena de valor.
5 Proveer a la población de alimentos saludables a base de macroalgas y sus coproductos	Fomentar el cultivo de macroalgas, el desarrollo de metodologías trazables, bioseguras y eficientes, así como la capacitación en la gestión de las biomásas de macroalgas según los productos específicos. Además, promover el financiamiento para agregar valor a la producción, con el objetivo de garantizar la seguridad alimentaria basada en macroalgas a nivel regional.
6 Fomentar una distribución equitativa del desarrollo económico en la sociedad	Incorporar innovaciones en nuevas especies y productos, promover la investigación transdisciplinaria y aplicar marcos regulatorios adecuados, respetando siempre el medio ambiente. Fomentar una interacción fluida entre comunidades, gobierno, industria y academia, trabajando además por la restauración social y medioambiental de las comunidades y su maritorio. Es fundamental asegurar que la creación de valor añadido se distribuya de manera justa y equitativa a lo largo de la cadena de producción, con el fin de avanzar desde el modelo actual de cultivo de macroalgas en América Latina hacia un modelo de economía azul, basado en los modos de vida sostenibles de las comunidades costeras.
7 Enfocar la producción en productos funcionales con valor agregado	Fomentar políticas con indicadores claros que permitan el monitoreo de nichos de mercado orientados a productos funcionales. Es necesario disponer de un catastro de productos funcionales por país, así como de las condiciones óptimas para su máxima producción mediante el cultivo de diversas especies nativas. Además, debe facilitarse una transferencia de conocimiento ágil entre la industria, la academia y el gobierno para su aprovechamiento. De este modo, se impulsará la innovación y el emprendimiento, generando valor añadido a las macroalgas cultivadas y atrayendo inversión para modernizar e impulsar las tecnologías de cultivo.
8 Impulsar la generación de empleos dignos	Diseñar políticas públicas que propicien un entorno favorable para el desarrollo de los cultivos y promuevan la I+D+i a lo largo de toda la cadena de valor de la producción de macroalgas. La colaboración entre gobierno, academia y cooperación transregional es clave para transferir y replicar las experiencias más exitosas, así como para generar programas de capacitación y estrategias para asignar zonas de cultivo adecuadas para el cultivo de macroalgas. La financiación estatal destinada a la implementación, capacitación y seguimiento de cultivos de menos de una hectárea será fundamental para la implementación de nuevos modelos de producción en las comunidades costeras.

Apéndice 1

PROPUESTAS INDIVIDUALES, CON MENSAJES DE FUERZA Y ACCIÓN PARA LOGRARLOS, ELABORADAS POR LOS 27 PARTICIPANTES DEL TALLER

Participante	Mensaje de Fuerza	Acción para lograrlo
<i>José Aguilar Manjarrez</i>	El cultivo y procesamiento de las macroalgas ejemplifican cómo el clima y la naturaleza pueden colaborar para mejorar el secuestro de carbono e impulsar la producción de biomasa, la cual puede utilizarse como alimento para consumo humano y ganado, así como para la producción de biocombustibles, bioplásticos y otros productos. Este proceso genera valor que beneficia a las comunidades costeras, incluidas las mujeres y los pueblos indígenas.	Fomentar una colaboración regional para desarrollar e implementar una estrategia de comunicación y capacitación que promueva la acuicultura sostenible de macroalgas en América Latina, dirigida a todos los niveles: responsables de la toma de decisiones, técnicos y comunidades costeras.
<i>Cristián Agurto</i>	América Latina tiene una gran oportunidad y el potencial de convertirse en un referente mundial en la producción de alimentos, ingredientes y aditivos funcionales a base de algas, diversificando su uso, aportando valor a la cadena productiva, promoviendo la innovación y generando nuevos nichos de mercado. Por ello, la acuicultura de macroalgas es esencial para un desarrollo sostenible en la región.	Impulsar la innovación y el emprendimiento de base biotecnológica como herramientas para atraer financiación, añadir valor, diversificar los usos de las macroalgas y fomentar el desarrollo tecnológico en los sistemas de cultivo.
<i>Marisol Alvarez</i>	Cultivo de macroalgas en América Latina: un mar de oportunidades para nuestras comunidades locales y el medioambiente.	Elaborar, implementar y monitorear un plan de acción para el desarrollo del cultivo de macroalgas en cada país, teniendo en cuenta los diferentes objetivos y la identificación de los actores públicos y privados necesarios para el logro de cada uno de ellos (como el desarrollo económico y productivo, la mitigación del cambio climático, entre otros). El plan deberá incluir las acciones previstas, los objetivos específicos, el modelo de gobernanza, los responsables asignados, los indicadores, las metas, y otros elementos relevantes.
<i>Francisco Araos</i>	La acuicultura de macroalgas en América Latina y el Caribe representa una oportunidad única para impulsar una transición justa y sostenible de la economía azul de la región.	Fortalecer los medios de vida de las comunidades costeras, fomentar la innovación de los emprendedores, promover la investigación aplicada y adaptar los marcos regulatorios para apoyar un desarrollo inclusivo y sostenible del sector.

Participante	Mensaje de Fuerza	Acción para lograrlo
<i>Marcella Amaral</i>	Es el momento de actuar con determinación y compromiso hacia un futuro sostenible para la acuicultura de macroalgas.	Implementar prácticas de cultivo que respeten y protejan los ecosistemas marinos, al tiempo que impulsen el desarrollo económico y social. Es fundamental fomentar la investigación científica, desarrollar tecnologías innovadoras y capacitar a los acuicultores con métodos que minimicen el impacto ambiental y maximicen la eficiencia.
<i>José Ávila</i>	El cultivo de macroalgas en América Latina debe de ser diverso, tanto en especies como en usos, con un enfoque centrado en el valor añadido más que en productos básicos.	Incrementar la inversión en investigación y fortalecer el trabajo de las comunidades a través de equipos multidisciplinares que acerquen el conocimiento, la tecnología y las oportunidades a la región.
<i>Marcela Ávila</i>	América Latina ofrece una amplia biodiversidad de macroalgas y espacios aptos para que las comunidades costeras desarrollen una acuicultura sostenible, adaptada a las características locales, orientada a la producción de alimentos, nutraceuticos y aditivos para el consumo humano. Se trata de una actividad productiva innovadora que genera ingresos y contribuye a mejorar la calidad de vida de las comunidades.	Implementar sistemas de financiación que respalden la instalación de cultivos, así como programas de capacitación y seguimiento técnico para explotaciones de hasta 1 hectárea.
<i>Paul Baltazar</i>	En América Latina, la acuicultura de macroalgas representa una oportunidad para impulsar una actividad sostenible que permita a las comunidades costeras integrarse en una cadena productiva de forma sostenible, generando mejoras económicas en ellos y acceso a alimentos para su entorno.	Impulsar el desarrollo de la acuicultura de macroalgas en América Latina como una actividad productiva sostenible, promoviendo la capacitación técnica, el acceso a tecnologías adecuadas y el fortalecimiento de cadenas de valor inclusivas. Esta acción permitirá integrar a las comunidades costeras en procesos económicos sostenibles, generar ingresos, empleo digno y alimentos nutritivos, contribuyendo a la seguridad alimentaria y al bienestar social, al mismo tiempo que se protege el medio marino.
<i>Alejandro Buschmann</i>	El desarrollo del cultivo de macroalgas en América Latina debe ser un motor clave para el desarrollo sostenible de la región.	Fomentar una comprensión integral del desarrollo sostenible, ambiental, social y económico, como base para orientar las decisiones y prácticas del sector de manera equilibrada y responsable.
<i>Carolina Camus</i>	La acuicultura de macroalgas en América Latina y el Caribe es una oportunidad para diversificar de forma sostenible la matriz productiva de los países de la región y ofrecer una alternativa que contribuya a la alimentación y a satisfacer las necesidades de una población mundial en constante crecimiento.	Fomentar la acción conjunta entre el sector privado y el público para establecer capacidad de procesamiento de la biomasa (añadiendo valor) en los países de la región, diversificar los mercados y revisar los marcos normativos para facilitar el establecimiento de granjas de cultivo capaces de suministrar biomasa de forma estable a lo largo del tiempo.

Participante	Mensaje de Fuerza	Acción para lograrlo
<i>Juan Diego Dupuy</i>	Los ojos del mundo están puestos en América Latina. Esto representa una oportunidad para fortalecer el conocimiento y la tecnología, adaptando a cada realidad específica los avances internacionales en el cultivo de macroalgas.	Promover la innovación, asegurar el presupuesto necesario, trabajar de forma colaborativa con las comunidades locales y establecer un marco regulatorio que sea ambientalmente viable.
<i>Ana Farías</i>	La acuicultura de macroalgas representa una gran oportunidad para las comunidades costeras que cultivan en pequeña escala, especialmente si se amplía su alcance y su objetivo de mercado con los productos funcionales para la salud humana y animal (nutracéuticos).	Elaborar un inventario de productos funcionales que puedan extraerse de las distintas especies nativas, ya sea en fase experimental o comercial, en cada país, identificando además las condiciones ambientales óptimas para obtener las mayores concentraciones de estos compuestos.
<i>Sylvain Faugeron</i>	En América Latina existe una gran diversidad de especies, ecosistemas y organizaciones de pequeños productores que permite el desarrollo de una acuicultura de macroalgas extensiva y diversificada, con múltiples aplicaciones y mercados potenciales.	Fomentar a aprovechar los diferentes niveles de diversidad, biológica, ambiental y social, como base para consolidar una industria sólida.
<i>Sebastian Gatica</i>	América Latina está en una posición privilegiada para convertirse en líder global en la producción de alimentos y aditivos funcionales derivados de macroalgas. La región cuenta con una rica biodiversidad y las condiciones ideales para desarrollar la acuicultura de macroalgas, lo que puede impulsar la innovación, diversificar mercados y agregar valor a la cadena productiva. Este sector es clave para el desarrollo sostenible y para mejorar la calidad de vida de las comunidades costeras, integrándolas en una economía azul justa y regenerativa.	Promover los procesos colaborativos entre comunidades y la industria para desarrollar metodologías de cultivo regenerativo de macroalgas. Estas deben incorporar trazabilidad y buenas prácticas, otorgando un valor distintivo a las macroalgas, al tiempo que impulsan la necesaria transición hacia la restauración social y medioambiental de las comunidades costeras y sus territorios.
<i>Cecilia Godoy</i>	América Latina cuenta con una gran diversidad humana que constituye la base para el desarrollo de una acuicultura de pequeña escala conectada con sus especies nativas y con sus realidades socioeconómicas, ambientales y culturales.	Potenciar acciones en estrecha colaboración con las comunidades, sus líderes y sus propios ritmos, promoviendo un enfoque participativo y adaptado al contexto local.
<i>Melanie Hughes</i>	El futuro de la acuicultura de macroalgas en América Latina debe basarse en un aprovechamiento integral de la biomasa producida, acompañado de la generación de valor añadido. Esto no solo contribuye a revalorizar el trabajo de los productores locales, sino que también permite crear nuevos puestos de trabajo.	Promover canales de comunicación fluidos entre la industria, las entidades científicas y los organismos gubernamentales, con el fin de facilitar la transferencia del conocimiento sobre los recursos disponibles y sus posibles aplicaciones.

Participante	Mensaje de Fuerza	Acción para lograrlo
<i>Pablo Leal</i>	El cocultivo de bivalvos y macroalgas representa una solución sostenible para los océanos de América Latina: mejora la calidad del agua, captura carbono y fortalece la economía costera. Impulsemos la acuicultura regenerativa para lograr mares más vivos y comunidades más resilientes.	Desarrollar proyectos piloto en comunidades costeras de América Latina, integrando el conocimiento local con la ciencia, para demostrar cómo el cocultivo puede generar ingresos sostenibles, restaurar ecosistemas marinos y contribuir a la seguridad alimentaria.
<i>Alessandro Lovatelli</i>	La producción de macroalgas en América Latina, destinada principalmente al mercado de exportación en forma de producto crudo y seco, resulta indispensable para la creación de empleo local y el desarrollo de oportunidades de negocio.	Fomentar políticas públicas más sólidas que refuercen los programas de investigación y desarrollo a lo largo de toda la cadena de valor, y que además favorezcan un entorno propicio para el crecimiento del sector a nivel regional.
<i>Adrián Márquez</i>	Apoyar la acuicultura de macroalgas en América Latina y el Caribe fomenta la sostenibilidad ambiental, impulsa el progreso económico y refuerza la reivindicación social de las comunidades costeras.	Generar valor añadido de las macroalgas, posicionándolas como uno de los sectores de la acuicultura con mayor potencial de sostenibilidad.
<i>Pedro Murúa</i>	La acuicultura de macroalgas en América Latina solo será sostenible si logra armonizar los aspectos productivos, socioambientales y de gobernanza. Al tratarse como una actividad productiva incipiente, tiene el potencial de convertirse en un ejemplo a nivel mundial de cómo estos elementos pueden impulsar la expansión de un sector sostenible a medio y largo plazo.	Fomentar el trabajo transdisciplinar a nivel local entre los diferentes actores de las cadenas de valor actuales y potenciales, promover la generación de conocimiento en todos los niveles y reforzar la colaboración a nivel regional.
<i>Teresa Nilo</i>	La acuicultura de macroalgas en América Latina es fundamental para impulsar la sostenibilidad marina, diversificar las economías costeras y promover un desarrollo equitativo y sostenible. Adaptar nuestras prácticas productivas al entorno socioambiental fortalece la gobernanza inclusiva con las comunidades costeras. A través de la educación, avanzamos hacia un futuro en el que las macroalgas sean un símbolo de prosperidad y sostenibilidad en toda la región.	Educar y potenciar el conocimiento en todas las etapas del desarrollo productivo de macroalgas pardas es esencial para promover una diversificación sostenible a nivel local, comunal, regional y nacional. Capacitar en prácticas respetuosas con el medio ambiente y que fortalezcan las economías locales es clave para un crecimiento equitativo y sostenible. ¡Educación y acción para que la innovación y la sostenibilidad de las macroalgas pardas impulsen nuestro desarrollo colectivo!

Participante	Mensaje de Fuerza	Acción para lograrlo
<i>Javier Parada</i>	Adaptar el modelo de negocio para desarrollar productos de mayor valor, en función de las necesidades y demandas del mercado.	Diseñar una política u hoja de ruta que contemple los potenciales y la visión del sector en torno a los indicadores clave que se desea alcanzar. No se trata de definir productos concretos, pues estos dependerán del contexto y las necesidades locales, sino de establecer una lógica que fomente y respalde la cobertura de nichos de mercado con productos rentables y de alto valor añadido.
<i>Raúl Rincones</i>	La maricultura de macroalgas representa una alternativa real para muchas comunidades costeras de América Latina y el Caribe, gracias a los beneficios socioeconómicos y los servicios ecosistémicos que ofrece frente a otras opciones, promoviendo así una auténtica economía azul.	Unificar esfuerzos entre entidades gubernamentales, instituciones académicas y agencias de cooperación internacional para establecer los lineamientos que permitan replicar y mejorar experiencias exitosas en distintos países y regiones. Esto incluye programas de financiación, capacitación, protocolos de bioseguridad y estrategias para la asignación de zonas destinadas a la acuicultura sostenible.
<i>Daniel Robledo</i>	En América Latina contamos con una gran riqueza cultural, humana y de recursos algales. Es el momento de aprovechar la coyuntura actual, el auge de las macroalgas y sus múltiples aplicaciones, para replantear nuestra forma de abordar este sector y proyectar una nueva visión.	Diversificar la acuicultura promoviendo enfoques restaurativos o regenerativos, e impulsar el cultivo de especies nativas. La diversidad de macroalgas en zonas templadas, subtropicales y tropicales representa nuestra mayor riqueza y valor diferencial.
<i>Miguel Sepúlveda</i>	El cultivo de macroalgas fortalece la seguridad alimentaria, proporciona ingredientes nutritivos, contribuye a frenar la pérdida de biodiversidad y, lo más importante, ofrece una alternativa que permite desvincularse de la agricultura tradicional.	Alentar el desarrollo de productos alternativos a partir de macroalgas, de modo que los productores no dependan exclusivamente de los precios volátiles de los ficocoloides y puedan realizar inversiones a largo plazo que les permitan gestionar sus riesgos de forma sostenible.
<i>Wagner Valenti</i>	El cultivo de macroalgas en América Latina debería desarrollarse a través de pequeñas granjas acuícolas de gestión familiar, priorizando las especies nativas y orientándose al mercado de la alimentación humana.	Los gobiernos y los responsables de las políticas públicas deben reconocer los bajos costos de implementación y la viabilidad económica de los cultivos en pequeña escala, y apoyar su desarrollo como alternativa sostenible y generadora de ingresos locales.

Participante	Mensaje de Fuerza	Acción para lograrlo
<i>José Zertuche González</i>	Las costas de América Latina y el Caribe ofrecen una de las áreas estratégicas más prometedoras a nivel mundial para el desarrollo del cultivo de macroalgas, gracias a su gran diversidad de costas y a sus condiciones favorables en términos de desarrollo económico y tecnológico.	Impulsar el desarrollo del cultivo de macroalgas como una actividad sostenible en la región, que incluya la participación gubernamental, la industria y la academia. Para ello, es fundamental contar con una organización con capacidad de influencia sobre los gobiernos regionales y respaldo académico. La FAO, a través de un programa específico para América Latina, podría desempeñar ese papel, tal como lo ha hecho en experiencias previas en pesca y acuicultura. Una solicitud coordinada por los gobiernos de la región podría ser atendida y respaldada económicamente por países donantes.

INFORMES COMISIONADOS

Perspectivas sobre el uso de macroalgas como fuente alimentaria de alto valor en América Latina

Javier Parada

*Universidad Austral de Chile
Valdivia, Chile*

Parada, J. 2025. *Perspectivas sobre el uso de macroalgas como fuente alimentaria de alto valor en América Latina*. En: Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Murúa Andrade, P. y Farías Molina, A. (coords.). Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 24-26 de junio de 2024, Puerto Varas, Chile. *FAO Actas de Pesca y Acuicultura*. N.º 74. Roma, FAO. pp. 31-48.

RESUMEN

Las macroalgas son plantas marinas que habitan comúnmente en aguas poco profundas de costas rocosas y de las cuales existe una gran diversidad. Esta revisión estudia el uso de macroalgas como alimentos en América Latina y analiza las perspectivas para consolidar la industria en la región. Se examinan las principales especies tradicionalmente consumidas y los aspectos clave para su incorporación en nuevos productos alimentarios. La investigación revela que, aunque limitada, existe una tradición de consumo de macroalgas en América Latina, donde más de 40 especies se han utilizado históricamente como alimento. Actualmente, la región representa una pequeña fracción de la producción mundial de macroalgas, concentrada en pocos países, con escasa presencia de técnicas de cultivo y limitada generación de valor para la obtención de productos finales. Esto indica un amplio potencial de crecimiento tanto en volumen como en valorización.

INTRODUCCIÓN

Las macroalgas marinas constituyen un recurso que se produce con marcadas diferencias en cuanto a volúmenes y presencia de acuicultura, con aproximadamente 50 países productores, y cerca de 300 especies comerciales. En 2019 la producción mundial de macroalgas alcanzó 35,7 millones de toneladas, con Asia dominando el mercado (97 %). China destaca como el principal productor mundial, con 20 millones de toneladas. La acuicultura representa el 97 % de esta producción global. Tanto en América del Norte como en América Latina y el Caribe, el aporte total a la producción mundial es de 1,36 %. Los principales productores son Chile (426 000 toneladas, ocupando el sexto lugar en la producción mundial de macroalgas), el Perú (36 000 toneladas), Canadá (12 000 toneladas), México (7 000 toneladas), y los Estados Unidos de América (3 000 toneladas). El resto del continente produce menos de 1 000 toneladas anuales, con un cultivo de macroalgas limitado que representa solo el 4,69 % del total regional (Cai *et al.*, 2021).

En cuanto a la distribución por tipos, las macroalgas rojas representan el 54 % de la producción total, las pardas el 46 % y las verdes menos del 1 %. Del volumen total

producido, el 87 % se destina a consumo humano: un 85 % se consume en estado fresco o seco y un 15 % se utiliza como ingredientes, principalmente hidrocoloides como alginato, agar y carragenina (FAO, 2020; Moreira *et al.*, 2021).

Las macroalgas, gracias a su alto valor nutricional y de compuestos bioactivos, son una materia prima que se utiliza en la industria farmacéutica, en la alimentación de peces y animales de abasto, en productos directamente destinados a la alimentación humana e, incluso, en la agricultura, donde se aprovecha su potencialidad como bioestimulantes y biofertilizantes (Das *et al.*, 2019). En el Cuadro 1 se muestran los principales usos de las macroalgas cultivadas a nivel mundial:

CUADRO 1

Principales usos o destinos comerciales de las macroalgas en el mundo

Grupo de macroalgas	Principales productos o usos finales
Pardas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alimentación humana (sopas, ensaladas, otros) 2. Alimentación animal 3. Alginato 4. Biofertilizantes/bioestimulantes 5. Productos farmacéuticos o nutraceuticos 6. Envases compostables 7. Otros
Rojas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Agar 2. Carragenina 3. Alimentación animal 4. Alimentación humana (ensaladas, encurtidos, ingrediente de sopa, envoltura de sushi, otros) 5. Otros
Verdes	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alimentación humana (ensaladas, otros) 2. Alimentación animal 3. Biofertilizante/bioestimulante 4. Productos cosméticos 5. Productos farmacéuticos 6. Otros

Fuente: Cai, J., Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Cornish, L., Dabbadie, L., Desrochers, A., Diffey, S., Garrido Gamarro, E., Geehan, J., Hurtado, A., Lucente, D., Mair, G., Miao, W., Potin, P., Przybyla, C., Reantaso, M., Roubach, R., Tauati, M. y Yuan, X. 2021. *Seaweeds and microalgae: an overview for unlocking their potential in global aquaculture development*. FAO Fisheries and Aquaculture Circular No. 1229. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb5670en>

Las macroalgas constituyen una fuente abundante de biomasa comestible. Sus características nutricionales las convierten en una opción ideal para desarrollar alimentos nutritivos y saludables, ya que son ricas en macro y micronutrientes de alto valor, como los indicados por Quitral *et al.* (2012):

- Proteínas ricas en glicina, arginina, alanina y ácido glutámico.
- Aminoácidos esenciales a niveles similares a los requerimientos indicados por la FAO y la Organización Mundial de la Salud (OMS) (aminoácidos limitantes son lisina y cistina).
- Polisacáridos no digeribles (fibra).
- Lípidos: proporciones saludables de ω -3 y ω -6.
- Vitaminas A, B1, B12, C y E, riboflavina, niacina, ácido pantoténico y ácido fólico.
- Minerales: macro y microminerales.
- Compuestos fenólicos: pueden presentar actividad antidiabética, antiinflamatoria, antioxidante, y otras.
- Carotenoides: como la fucoxantina, que presenta actividad anti-obesidad.

Estos compuestos confieren a las macroalgas propiedades beneficiosas y atractivas para obtener alimentos de alto valor (Rengasamy *et al.*, 2020; Shannon y Abu-Ghannam, 2019). De hecho, evidencias epidemiológicas muestran que un mayor consumo de macroalgas se relaciona con menor incidencia de cardiopatía isquémica,

menor mortalidad por accidente cerebrovascular, y menor obesidad y enfermedades relacionadas con la dieta (Murai *et al.*, 2021; Shannon y Abu-Ghannam, 2019).

Aunque el interés por las macroalgas como fuente de alimentos saludables se ha expandido en todo el mundo, los países asiáticos continúan siendo sus principales consumidores. El aumento del consumo mundial se debe tanto a la globalización de comidas de origen asiático, como al desarrollo de nuevos productos (Shannon y Abu-Ghannam, 2019). Sin embargo, el consumo de las macroalgas como alimento o medicina tiene raíces profundas en América Latina. Los vestigios más antiguos de este uso se encontraron en el sitio arqueológico de Monte Verde II, en lo que hoy es el sur de Chile, y datan de alrededor de 14 000 años, en lo que es, de hecho, uno de los vestigios más tempranos del poblamiento americano (Dillehay *et al.*, 2008). Por lo tanto, el consumo de macroalgas forma parte integral de la historia del continente.

Esta revisión presenta un análisis del uso de macroalgas en América Latina y examina su potencial como alimento de alto valor.

Producción de ficocoloides en América Latina

El mundo occidental, incluida América Latina y el Caribe, centra su producción de macroalgas en la obtención de ficocoloides, los cuales son sustancias gelificantes presentes en las macroalgas marinas. Estos compuestos químicamente son polisacáridos complejos que forman parte de la estructura de los tejidos de macroalgas marinas. Se pueden extraer para su uso como agentes gelificantes, estabilizantes, espesantes y emulsificantes en diversos productos, incluyendo alimentos, fármacos, cosméticos (FAO, 2024). Según Häder (2021) entre los diversos ficocoloides descritos, los de mayor importancia comercial son:

- Agar (agar-agar), obtenido de macroalgas rojas, como son especies de los géneros *Gigartina*, *Gracilaria*, *Hypnea*, *Sphaerococcus*, *Acanthopeltis*, *Ceramium* y *Gloiopeltis*.
- Carragenina, obtenida desde macroalgas rojas, tales como las de los géneros *Chondrus*, *Euचेuma* y *Gigartina*.
- Alginato (ácido alginico), obtenido de macroalgas pardas, incluyendo especies de *Fucus*, *Macrocystis*, *Ascophyllum*, *Sargassum* y *Laminaria*.

En el sector alimentario, los ficocoloides se emplean como estabilizantes y modificadores de textura en productos cárnicos (como en embutidos), lácteos (quesos, cremas y otros) y vegetales. En el ámbito farmacéutico, se utilizan en sistemas de administración de medicamentos, tales como comprimidos y supositorios (Lomartire y Gonçalves, 2023).

En 2019, la producción mundial de macroalgas carragenófitas (de las que se extrae carragenina) alcanzó los 11,7 millones de toneladas, de las cuales América Latina y el Caribe aportó 62 961 toneladas mediante la explotación silvestre de cinco especies, principalmente de Chile y el Perú. Respecto a las macroalgas agarofitas (de las cuales se extrae agar), la producción mundial fue de 3,7 millones de toneladas en ese mismo año, con la mayoría proveniente del cultivo de *Gracilaria* fuera de América Latina. En la región, Chile destaca como el principal productor con 53 955 toneladas extraídas de fuentes silvestres. Las principales especies de macroalgas utilizadas en América Latina para la obtención de ficocoloides son las que se muestran en el Cuadro 2.

El Cuadro 3 muestra la participación de América Latina en la producción mundial de ficocoloides, expresada en valores de exportación. Entre todos los países de América Latina, solo Chile se posiciona entre los 10 primeros exportadores mundiales de ficocoloides. Además, tanto Chile como el Perú se encuentran entre los 10 mayores exportadores de macroalgas como materia prima, las cuales se destinan principalmente a la producción de ficocoloides.

CUADRO 2
Principales especies de macroalgas utilizadas en América Latina para la obtención de ficoloides y los respectivos países más relevantes en la producción (cultivos y extracción desde fuentes silvestres)

Macroalgas	Especie	País
Agarofitas	<i>Gracilaria</i> (pelillo)	Chile
		Brasil
	<i>Gelidium</i> (chasca)	Chile
Carragenofitas	<i>Kappaphycus/Eucheuma</i>	Brasil
		Santa Lucia
		Ecuador
		Granada
		Belice
		Venezuela (República Bolivariana de)
	<i>Sarcothalia crispata</i>	Chile
	<i>Gigartina skottsbergii</i>	Chile
	<i>Mazzaella laminarioides</i>	Chile
	<i>Gymnogongrus furcellatus</i>	Chile
	<i>Chondracanthus chamissoi</i>	Perú
	Chile	
Alginofitas	<i>Lessonia</i> spp.	Chile y Argentina
	<i>Macrocystis</i> spp.	Chile y Argentina

Fuentes: Alemañ, A.E., Robledo, D. y Hayashi, L. 2019. Development of seaweed cultivation in Latin America: current trends and future prospects. *Phycologia*, 58(5): 462–471. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1640996>
Cai, J., Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Cornish, L., Dabbadie, L., Desrochers, A., Diffey, S., Garrido Gamarro, E., Geehan, J., Hurtado, A., Lucente, D., Mair, G., Miao, W., Potin, P., Przybyla, C., Reantaso, M., Roubach, R., Tauati, M. y Yuan, X. 2021. *Seaweeds and microalgae: an overview for unlocking their potential in global aquaculture development*. FAO Fisheries and Aquaculture Circular No. 1229. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb5670en>
Vásquez, J.A. y Fonck, E.A. 1993. *Estado actual y perspectivas de la explotación de algas alginofitas en Sudamérica*, en Situación actual de la industria de macroalgas productoras de ficoloides en América Latina y el Caribe. <https://www.fao.org/4/ab483s/ab483s02.htm>

CUADRO 3
Principales países exportadores de macroalgas y ficoloides en 2019 (de un total de 98 países exportadores)

País	Macroalgas totales exportadas (desde cultivos y fuentes naturales)		Ficoloides totales exportados (desde cultivos y fuentes naturales)	
	Millones de USD	Participación a nivel mundial (%)	Millones de USD	Participación a nivel mundial (%)
Total mundial	909	100,00	1 743	100,00
China	55	6,03	523	30,00
Filipinas	38	4,23	214	12,28
Chile	86	9,43	123	7,06
Perú	22	2,43	s/i	s/i*
Estados Unidos de América	18	1,98	84	4,82
Indonesia	218	24,01	110	6,34
República de Corea	278	30,55	43	2,45
Resto del mundo	194	21,34	646	37,06

*Nota: s/i: sin información.

Fuente: Cai, J., Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Cornish, L., Dabbadie, L., Desrochers, A., Diffey, S., Garrido Gamarro, E., Geehan, J., Hurtado, A., Lucente, D., Mair, G., Miao, W., Potin, P., Przybyla, C., Reantaso, M., Roubach, R., Tauati, M. y Yuan, X. 2021. *Seaweeds and microalgae: an overview for unlocking their potential in global aquaculture development*. FAO Fisheries and Aquaculture Circular No. 1229. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb5670en>

Consumo de macroalgas en América Latina

El consumo humano de macroalgas en América Latina y el Caribe, aunque limitado, abarca 47 especies según Espinoza-Avalos (1995). De estas, 38 son macroalgas rojas, seis pardas y tres verdes. Los principales países consumidores históricos han sido Chile, el Perú, Santa Lucía y Jamaica, aunque pueden encontrarse otras comunidades que consumen macroalgas como alimento en varios países. En el Cuadro 4 se identifican cuatro patrones de consumo en la región: (i) el uso por parte de inmigrantes, principalmente orientales, a través de restaurantes asiáticos, tiendas naturistas y farmacias; (ii) el consumo en el Caribe, específicamente para preparar bebidas frías y otros platos, cuya tradición ha sido heredada de tradiciones europeas de Irlanda y el Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte; (iii) el uso tradicional desde épocas prehispánicas, principalmente en Chile y en el Perú; y (iv) el consumo por grupos autóctonos específicos, como los habitantes de Isla de Pascua y el pueblo Mapuche en Chile, los Pataxó en el Brasil, o los Cuna del Panamá. Estas macroalgas, con su rica historia como fuente de alimentos, deberían ser consideradas las primeras candidatas para la obtención de productos en el futuro, así como para promover su cultivo.

CUADRO 4

Macroalgas usadas como alimento humano en América Latina y el Caribe

Especie	Uso	País
Macroalgas verdes		
<i>Ulva costata</i>	Desde tiempos prehispánicos	Perú
<i>Ulva lactuca</i> L.	Desde tiempos prehispánicos Por grupos autóctonos	Perú, Chile
<i>Ulva lactuca</i> f. <i>latissima</i> (L.)	Desde tiempos prehispánicos	Perú, Chile
Macroalgas pardas		
<i>Dictyopteris repens</i>	Por grupos autóctonos	Chile
<i>Durvillaea antarctica</i>	Desde tiempos prehispánicos	Chile
<i>Hizikia</i> sp.	Por inmigrantes, en restaurantes orientales y en tiendas de alimentos para la salud	México
<i>Laminaria</i> sp.	Por inmigrantes, en restaurantes orientales y en tiendas de alimentos para la salud	México, Panamá
<i>Macrocystis pyrifera</i> (L.)	Por inmigrantes, en restaurantes orientales y en tiendas de alimentos para la salud	México
<i>Undaria</i> sp.	Por inmigrantes, en restaurantes orientales y en tiendas de alimentos para la salud	México
Macroalgas rojas		
<i>Acaniophora spicifera</i>	En países caribeños	Antillas Occidentales
<i>Agardhiella</i> sp.	En países caribeños	México
<i>Bryothamnion triquetrum</i>	En países caribeños	México
<i>Chondrus crispus</i>	Por inmigrantes, en restaurantes orientales y en tiendas de alimentos para la salud	Panamá
<i>Eucheuma isiforme</i>	En países caribeños	Antillas Occidentales, Belice
<i>Eucheuma</i> sp.	En países caribeños	México
<i>Gelidium robustum</i>	Por inmigrantes, en restaurantes orientales y en tiendas de alimentos para la salud	México
<i>Gigartina chamissoi</i>	Desde tiempos prehispánicos	Perú
<i>Gigartina chauvinii</i>	Desde tiempos prehispánicos	Perú
<i>Gigartina glomerata</i>	Desde tiempos prehispánicos	Perú
<i>Gigartina paitensis</i>	Desde tiempos prehispánicos	Perú
<i>Gigartina</i> sp.	En países caribeños	Panamá
<i>Gracilaria blodgettii</i>	En países caribeños	México, Panamá
<i>Gracilaria cervicornis</i>	En países caribeños	Antillas Occidentales

CUADRO 4 (CONTINUACIÓN)

Especie	Uso	País
<i>Gracilaria cornea</i>	En países caribeños	México, Panamá, Antillas Occidentales
<i>Gracilaria crassissima</i>	En países caribeños	México, Panamá, Antillas Occidentales
<i>Gracilaria domingensis</i>	En países caribeños	Antillas Occidentales
<i>Gracilaria mammillaris</i> (Mont.)	En países caribeños	Panamá
<i>Gracilaria papenfussii</i>	En países caribeños	Antillas Occidentales
<i>Gracilaria</i> GT	En países caribeños	Antillas Occidentales
<i>Gracilaria</i> sp. (flattened)	En países caribeños	Antillas Occidentales
<i>Gracilaria</i> sp. ("terete")	En países caribeños	Antillas Occidentales
<i>Grateloupia doryphora</i>	Por inmigrantes, en restaurantes orientales y en tiendas de alimentos para la salud	Perú
<i>Grateloupia filicina</i> (L.)	En países caribeños	Antillas Occidentales
<i>Gymnogongrus tenuis</i>	En países caribeños	Panamá
<i>Hypnea musciformis</i>	En países caribeños	Antillas Occidentales
<i>Laurencia</i> sp.	En países caribeños	México
<i>Palmaria palmata</i> (L.)	Por inmigrantes, en restaurantes orientales y en tiendas de alimentos para la salud	México
<i>Porphyra acanthophora</i>	Por inmigrantes, en restaurantes orientales y en tiendas de alimentos para la salud	Brasil
<i>Porphyra columbina</i>	Por inmigrantes, en restaurantes orientales y en tiendas de alimentos para la salud	Perú, Chile, Argentina
<i>Porphyra leucosticta</i>	Desde tiempos prehispánicos	Perú, Bolivia (Estado Plurinacional de)
<i>Porphyra spiralis</i>	Por inmigrantes, en restaurantes orientales y en tiendas de alimentos para la salud	Brasil
<i>Porphyra</i> sp.	Por inmigrantes, en restaurantes orientales y en tiendas de alimentos para la salud	México, Panamá, Brasil
<i>Prionitis decipiens</i>	Desde tiempos prehispánicos	Perú
<i>Rhodoglossum denticulatum</i>	Desde tiempos prehispánicos	Perú
<i>Solieria filiformis</i>	En países caribeños	Antillas Occidentales

Fuente: Espinoza-Avalos, J. 1995. Algas marinas como alimento humano en Latinoamérica y el Caribe. *AvaCient* 14: 3-12. https://www.researchgate.net/publication/289377548_Algas_marinas_como_alimento_humano_en_Latinoamerica_y_el_Caribe#full-text.

Desde una perspectiva global, se estima que sobre el 60 % de las especies de macroalgas conocidas se usan como alimento. Los países asiáticos son los principales consumidores, donde son parte de la dieta tradicional, siendo mucho menos relevante en las dietas del resto del mundo. En los países occidentales, incluidos países de América Latina, las macroalgas se utilizan principalmente para la extracción de hidrocoloides (como agar, carragenina y alginatos) y no para consumo directo, a pesar de su reconocido valor nutricional y beneficios para la salud (Quitral *et al.*, 2012). En consecuencia, las macroalgas han sido identificadas como una prometedora fuente de alimentos para contribuir con la seguridad alimentaria mundial, en especial a los países de ingresos medios y bajos (Webb Somers y Thilsted, 2023; Camurati, Hocsmán y Salomone, 2019).

Aunque el consumo de macroalgas como alimento sigue siendo limitado, la globalización de la alimentación ha impulsado el consumo de algunas especies en países no asiáticos. Un ejemplo claro es el caso de *nori*, ingrediente imprescindible del sushi (Koch *et al.*, 2021). En América Latina, la incorporación de las macroalgas en la cocina de vanguardia podría facilitar su adopción generalizada en todos los estratos sociales, siguiendo un patrón similar al observado en Europa (Pérez-Lloréns, 2019).

Aspectos relevantes de las macroalgas en relación con su aporte nutricional y beneficios para la salud

Las macroalgas se dividen en tres grandes grupos, las macroalgas pardas (Phaeophyta), las macroalgas rojas (Rhodophyta) y las macroalgas verdes (Chlorophyta). Estos grupos se diferencian en los pigmentos que les entregan sus tonalidades, pero también en su composición general, de la cual se derivan sus potenciales como alimentos nutritivos y saludables (Quitral *et al.*, 2012).

Por ejemplo, las macroalgas pardas tienen una alta concentración de aminoácidos fosforados, mientras que las macroalgas rojas presentan el aminoácido libre taurina, que en el ser humano actúa como osmoregulador, inmunomodulador, estabilizador de membrana, y tiene un rol muy importante en el desarrollo ocular y del sistema nervioso, siendo especialmente importante su consumo durante las primeras etapas de la vida. En cuanto a los minerales, las macroalgas son ricas en macrominerales (sodio, calcio, potasio, cloro, sulfuro y fósforo) y microminerales (yodo, hierro, zinc, cobre, selenio, molibdeno, flúor, manganeso, boro, níquel y cobalto). Su contenido mineral total puede superar el 35 % del peso seco. Además, su baja relación Na/K (sodio/potasio) y su alto aporte de minerales poco comunes en otros alimentos, como el caso del yodo, les confieren un perfil nutricional particularmente saludable (Mohamed, Hashim y Rahman, 2012).

El contenido más alto de macronutrientes en macroalgas lo representan los hidratos de carbono. Estos se presentan principalmente como polisacáridos no digeribles (no glicémicos) y poseen un alto porcentaje de fibra dietética (36 a 60 % de su materia seca). La fibra dietética soluble representa más del 50 % del total y ofrece múltiples beneficios: aumenta la viscosidad del contenido gastrointestinal, reduce la respuesta glicémica, disminuye los niveles de colesterol en el plasma y actúa como prebiótico (Peñalver *et al.*, 2020).

El contenido de lípidos en las macroalgas es bajo, siendo en general de entre 1 a 5 % de la materia seca, lo cual es saludable. Además, estos lípidos contienen una mayor proporción de ácidos grasos esenciales en comparación a los lípidos provenientes de plantas terrestres. Destaca especialmente la gran presencia de ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga de la familia ω -3, particularmente los ácidos eicosapentaenoico (EPA) y docosahexaenoico (DHA), que aportan múltiples beneficios para la salud. La relación de ácidos grasos ω -6: ω -3 es muy baja en macroalgas, lo que es muy favorable, mientras que el perfil específico de ácidos grasos varía según la especie (Kumari *et al.*, 2010).

El Cuadro 5 presenta algunos ejemplos de macroalgas encontradas en América Latina y muestra su composición nutricional, destacando un alto contenido de cenizas y carbohidratos, una proporción significativa de proteínas y un bajo contenido de lípidos.

Los compuestos bioactivos son sustancias naturales o sintéticas con la capacidad de interactuar con uno o más componentes de los tejidos vivos y ejercer una amplia gama de efectos (Vilas-Boas, Pintado y Oliveira, 2021). Este importante grupo de nutrientes contribuye a generar alimentos con propiedades saludables y efectos preventivos contra enfermedades, aunque no son esenciales para el desarrollo humano (Alongi y Anese, 2021). Las macroalgas son ricas en diferentes compuestos bioactivos que varía según la especie: polifenoles (incluidos ácidos fenólicos, taninos, flavonoides, catequinas y florotaninos), carotenoides (carotenos, licopeno, fucoxantina, zeaxantina, luteína, neoxantina y violaxantina), tocoferoles, vitamina C, entre otros. Estos compuestos han demostrado tener al menos una o más actividades biológicas beneficiosas para el consumidor, incluyendo propiedades antioxidantes, antidiabéticas, anticancerígenas, antimicrobiana, anti-obesidad y anti-inflamatorias (Quitral *et al.*, 2022).

Por último, las macroalgas son importantes para la salud cerebral debido a la presencia de nutrientes esenciales para el desarrollo y mantenimiento de este, como son

CUADRO 5
Composición nutricional de macroalgas encontradas en América Latina

Alga	País de origen	Cenizas (% peso seco)	Proteínas (% peso seco)	Lípidos (% peso seco)	Fibra (% peso seco)	Carbohidratos (% peso seco)	Energía (kcal/kg)	Fuente
<i>C. chamissoi</i>	Perú	13,34	12,16	0,16	-	62,65	-	Vilcanqui et al. (2021)
<i>M. pyrifera</i>	Perú	43,74	5,86	0,74	-	43,29	-	Vilcanqui et al. (2021)
<i>C. fragile</i>	Invasora en varios países de américa	20,9±0,2	10,8±0,0	1,5±0,0	-	66,8±0,4	3239	Ortiz et al. (2009)
<i>G. chilensis</i>	Chile	18,9±0,1	13,7±0,2	1,3±0,0	-	66,1±1,2	3309	Ortiz et al. (2009)
<i>M. pyrifera</i>	Muchos países de américa	10,8±0,3	13,2±0,0	0,7±0,1	-	75,3±0,2	3603	Ortiz et al. (2009)
<i>A. spicifera</i>	Ecuador	28,38±0,39	5,07±0,01	0,55±0,01	2,42±0,24	44,76±0,01	2041,65±0,66	D'Armas et al. (2019)
<i>C. clavulatum</i>	Ecuador	36,69±0,22	4,78±0,02	0,75±0,02	2,02±0,11	32,24±0,12	1547,26±2,99	D'Armas et al. (2019)
<i>H. spinella</i>	Ecuador	33,07±0,12	8,02±0,01	1,44±0,01	4,41±0,19	34,46±0,18	1828,19±5,94	D'Armas et al. (2019)
<i>K. alvarezii</i>	Ecuador	27,49±0,15	4,86±0,01	0,57±0,01	3,18±0,11	41,15±0,11	1890,42±2,84	D'Armas et al. (2019)
<i>P. pavonica</i>	Ecuador	24,85±0,26	5,53±0,01	0,83±0,01	4,94±0,16	43,39±0,16	2030,61±4,91	D'Armas et al. (2019)
<i>S. schroederi</i>	Ecuador	34,58±0,20	5,21±0,02	3,07±0,02	4,28±0,20	40,04±0,21	2085,26±6,32	D'Armas et al. (2019)
<i>U. lactuca</i>	Ecuador	26,99±0,26	5,54±0,02	0,33±0,01	0,96±0,03	45,52±0,04	2071,45±0,15	D'Armas et al. (2019)
Conjunto de macroalgas arrastradas por el mar (24 rojas, 9 verdes y 4 pardas)	Brasil	14,63	12,2	0,35	n/a	65,3	-	de Oliveira et al. (2009)
<i>U. lactuca</i>	Mayoría de los países	11,0±0,1	27,2±1,1	0,3±0,0	60,5±0,6	61,5±2,3	-	Ortiz et al. (2006)
<i>D. antarctica</i> (fronda)	Chile	17,9±1,2	10,4±0,3	0,8±0,1	71,4±0,5	70,9±2,7	-	Ortiz et al. (2006)
<i>D. antarctica</i> (tallo)	Chile	25,7±2,5	11,6±0,9	4,3±0,6	56,4±0,4	58,4±1,2	-	Ortiz et al. (2006)
<i>U. fasciata</i>	México	12,9±1,5	8,5±0,0	4,5±0,03	28,2±0,9	45,9±1,4	-	Hernández-Cruz et al. (2022)
<i>S. cymosum</i>	México	42,1±0,0	5,9±0,1	4,5±0,1	35,1±0,5	12,3±1,1	-	Hernández-Cruz et al. (2022)
<i>G. subpectinata</i>	México	20,2 ±0,1	16,9±0,0	5,3±0,5	22,4±0,2	45,1±0,5	-	Hernández-Cruz et al. (2022)

Nota: Elaboración del autor a partir de recopilación de los trabajos indicados.

la taurina, el zinc, el magnesio, el yodo y los ácidos grasos poliinsaturados esenciales (PUFA), específicamente el ácido alfa-linolénico (ALA), el ácido docosahexaenoico (DHA) y el ácido eicosapentaenoico (EPA). De hecho, existe la hipótesis de que las macroalgas contribuyeron al desarrollo del cerebro durante la evolución humana (Cornish, Critchley y Mouritsen, 2017).

El Cuadro 6 muestra ejemplos de macroalgas de América Latina y su actividad biológica, las cuales pueden ser aprovechadas en la industria alimentaria.

CUADRO 6
Actividad biológica de macroalgas encontradas en América Latina

Macroalga	País de origen	Actividad biológica	Fuente
<i>P. columbina</i>	Chile	Cobalamina biológicamente disponible	Webb, Somers y Thilsted (2023)
<i>C. fragile</i>	Invasora en varios países de América	Niveles de aminoácidos esenciales similares a los cereales (trigo, el maíz y la avena). Contenido de β -caroteno (pro-vitamina A)	Ortiz et al. (2009)
<i>G. chilensis</i>	Chile	Niveles de aminoácidos esenciales similares a los cereales (trigo, el maíz y la avena). Contenido de β -caroteno (pro-vitamina A)	Ortiz et al. (2009)
<i>M. pyrifera</i>	Muchos países de América Latina	Niveles de aminoácidos esenciales similares a los cereales (trigo, el maíz y la avena). Alto contenido de α -tocoferol (vitamina E).	Ortiz et al. (2009)
<i>P. orbicularis</i>	Chile	Actividad antioxidante, anti-diabetes, anti-inflamatoria y antimicrobiana	García et al. (2020)
<i>Ulva</i> spp.	Chile	Actividad antioxidante, anti-diabetes, anti-inflamatoria y antimicrobiana	García et al. (2020)
<i>U. Lactuca</i>	Mayoría de los países	Niveles relativamente altos de aminoácidos esenciales, ácidos grasos poliinsaturados y tocoles provitamina E	Ortiz et al. (2006)
	Ecuador	Alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados (especialmente EPA), relación n-6/n-3 menor a 1, y un alto contenido de polifenoles.	D'Armas et al. (2023)
<i>S. schroederi</i>	Ecuador	Alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados (especialmente EPA), relación n-6/n-3 menor a 1, y un alto contenido de polifenoles.	D'Armas et al. (2023)
<i>D. antarctica</i>	Chile	Actividad antioxidante, anti-diabetes, anti-inflamatoria y antimicrobiana. Impacto positivo en el sistema inmune	García et al. (2020) Guerrero-Wyss et al. (2023)
		Niveles relativamente altos de aminoácidos esenciales, ácidos grasos poliinsaturados y tocoles provitamina E	Ortiz et al. (2006)
<i>G. birdiae</i>	Brasil	Fuente de compuestos antioxidantes (apigenina y ácido gálico, principalmente).	Souza et al. (2011)
<i>G. cornea</i>	Brasil	Fuente de compuestos antioxidantes (apigenina y ácido gálico, principalmente).	Souza et al. (2011)
<i>C. chamissoi</i>	Perú	Importante contenido de aminoácidos esenciales. Significativa concentración de polifenoles totales y alta capacidad antioxidante	Vilcanqui et al. (2021)
<i>M. pyrifera</i>	Perú	Importante contenido de ácidos grasos poliinsaturados (ω -6) y tocoferoles. Significativa concentración de polifenoles totales y alta capacidad antioxidante	Vilcanqui et al. (2021)
<i>G. mammillaris</i>	Colombia	Antioxidante	Arias-Echeverri et al. (2022)
<i>H. musciformis</i>	Colombia	Antimicrobiana; compuestos fenólicos y esteroidales	Arias-Echeverri et al. (2022)
<i>Laurencia</i> sp.	Colombia	Antioxidante	Arias-Echeverri et al. (2022)
<i>L. microcladia</i>	Colombia	Antibacteriana	Arias-Echeverri et al. (2022)
<i>C. mexicana</i>	Colombia	Antibacteriana; Antioxidante	Arias-Echeverri et al. (2022)
<i>D. bartayresiana</i>	Colombia	Antibacteriana; Inhibidor de alimentación	Arias-Echeverri et al. (2022)
<i>P. boergesenii</i>	Colombia	Antibacteriana	Arias-Echeverri et al. (2022)

Nota: Elaboración del autor a partir de recopilación de los trabajos indicados.

Modos de incorporación de macroalgas en alimentos

Tradicionalmente las macroalgas marinas se consumen en su estado natural, generalmente secas (para su conservación), como parte de preparaciones tradicionales que incluyen ensaladas, caldos y guisos. Aunque en los últimos años se han desarrollado dos formas adicionales de recuperación: la harina de macroalgas (deshidratadas y finamente molidas) y los extractos (con el fin de obtener compuestos de interés específicos). Estos productos pueden utilizarse como ingredientes en alimentos procesados (formulados),

lo que amplía significativamente las posibilidades de diversificación (Gullón *et al.*, 2020). El principal desafío tecnológico consiste en mantener las propiedades beneficiosas de las macroalgas mientras se controlan los aspectos no deseados, como la presencia en el producto final de concentraciones no aceptables de metales pesados derivados de esta materia prima, aunque en su estado natural las macroalgas raramente presentan niveles tóxicos de estos elementos (Cavallo *et al.*, 2021).

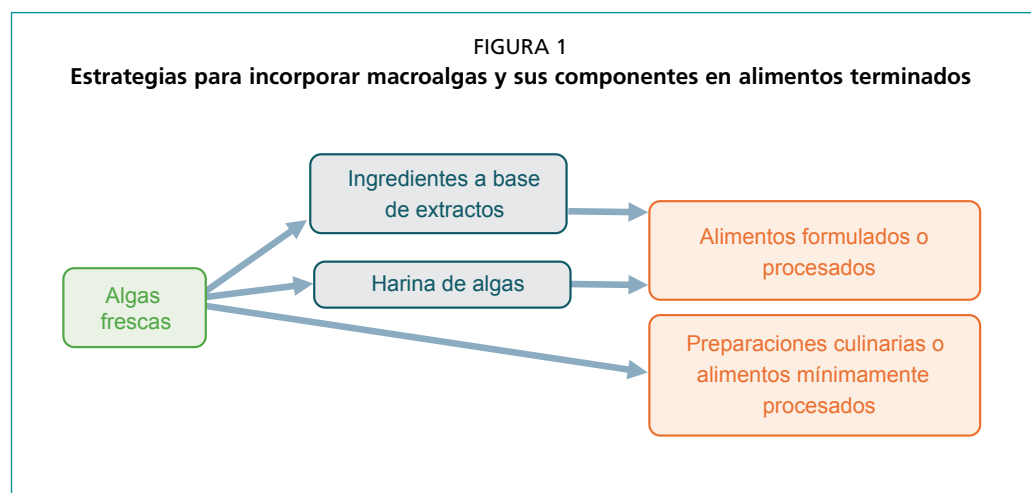
La Figura 1 resume las estrategias para incorporar las macroalgas y sus componentes en los alimentos.

En la actualidad es posible encontrar tres formas principales de alimentos procesados o formulados que incorporan macroalgas en forma de harina o extractos para su elaboración: *snacks*, productos cárnicos, y productos farináceos.

Los *snacks* o tentempiés son productos pensados para ser consumidos en pequeñas cantidades entre las comidas principales. Cuando están elaborados con ingredientes naturales o contienen compuestos saludables pueden ser considerados beneficiosos (Hess, Jonnalagadda y Slavin, 2016; Potter, Vlassopoulos y Lehmann, 2018).

Los productos cárnicos (productos preparados, total o parcialmente, con carnes, despojos, grasas y subproductos comestibles) son generalmente saludables cuando se consumen en cantidades adecuadas, ya que contienen proteínas de alto valor biológico y aminoácidos esenciales, además de minerales y vitaminas (del complejo B). Sin embargo, su consumo excesivo genera preocupación debido a su contenido de ácidos grasos saturados y colesterol (Woodgate y Van der Veen, 2014). Por esta razón, se está investigando la reformulación con ingredientes saludables derivados de macroalgas para mejorar su vida útil (como el control de oxidación lipídica), y sus beneficios antioxidantes para el consumidor (Gullón *et al.*, 2020).

Los productos farináceos (o amiláceos) son aquellos basados con harinas naturalmente ricas en almidón, siendo la harina de trigo la más común. Entre estos se encuentran principalmente el pan y las pastas, con todas sus variantes. Su consumo excesivo se asocia con alteraciones en el metabolismo de la glucosa, lo que constituye un factor de riesgo para varias enfermedades, como la diabetes tipo 2. Por esta razón, la incorporación de macroalgas en la formulación de estos productos se está considerando como una estrategia para hacerlos más saludables, ya que afectan a las enzimas relacionadas con la digestión del almidón, entre otros mecanismos (Parada, Pérez-Correa y Pérez-Jiménez, 2019). Las macroalgas (o sus componentes, como polifenoles) pueden reducir la glucemia postprandial (efecto antihiper glucémico o antidiabético) mediante tres mecanismos: la disminución del contenido relativo de almidón (efecto de dilución), la reducción de la digestión del almidón mediante la inhibición de las enzimas digestivas y la modulación del transporte de la glucosa en la sangre (Lu y Chen, 2022).



Productos terminados y valor agregado

En general, América Latina produce productos de macroalgas con poco valor agregado. Por ejemplo, la macroalga más explotada en los últimos cinco años en Chile ha sido el Huiro negro (o Chascón; *Lessonia berteorana* / *Lessonia spicata*, ex *Lessonia nigrescens*). El 90 % de su producción se destina a la exportación como macroalga seca picada, mientras que el resto se destina a la extracción de subproductos en el mercado local (ácido alginico, alginato y polímero natural) (<https://www.sernapesca.cl/>). Esto indica que una gran cantidad de esta macroalga se exporta como producto poco procesado y de bajo valor comercial.

Las estadísticas indican que América Latina representa una fracción menor en la producción mundial de macroalgas (1,2 % en 2016). De esta producción, el 96 % proviene de poblaciones naturales y solo un 4 % proviene de la acuicultura. Chile lidera la producción en América Latina con el 88 % de las cosechas (329 000 toneladas), seguido por el Perú (4,1 %), México (3,7 %), y otros países (Alemañ, Robledo y Hayashi, 2019; Cai *et al.*, 2021).

Las comunidades que extraen y comercializan macroalgas suelen conseguir bajos precios por su producto debido a la escasa agregación de valor y la presencia de intermediarios. El Cuadro 7 ilustra esta situación con los valores pagados por intermediarios a recolectores de orilla en la comuna de Corral, Chile. Estos precios son consistentes con el promedio mundial de 2019 pagado por las macroalgas al primer vendedor: USD 0,47/kg (peso húmedo) para macroalgas pardas, USD 0,39/kg para macroalgas rojas y USD 0,79/kg para macroalgas verdes (Cai *et al.*, 2021).

Los datos presentados evidencian que el mercado de América Latina de las macroalgas para alimentos se caracteriza por tres aspectos principales: volúmenes limitados, predominio de extracción desde fuentes naturales y escasa agregación de valor.

El procesamiento y obtención de productos de mayor valor comercial pueden incrementar significativamente los precios de las macroalgas, dinamizando así la cadena de valor. La Figura 2 muestra cómo aumenta el precio según el grado de sofisticación del producto elaborado a base de macroalgas. Este desarrollo de productos requiere actividades sistémicas de Investigación, Desarrollo e Innovación (Parada, Pérez-Correa y Pérez-Jiménez, 2019).

Una manera de mejorar los precios pagados a las comunidades recolectoras de macroalgas sería integrarlas como participantes en las cadenas de valor, vinculando el precio con el valor final del producto. Asimismo, las comunidades deberían enfocarse en vender sus recursos a empresas productoras de productos de alto valor, lo cual requiere adaptar sus modelos productivos a las normas sanitarias nacionales. Un ejemplo concreto sería gestionar el ingreso al mercado de la Unión Europea con productos de macroalgas, mediante la aprobación de estos productos según la normativa para “*novel food*”, que establece requisitos para la introducción de nuevos productos (Fundación Chile, 2018; CIBAS, 2017).

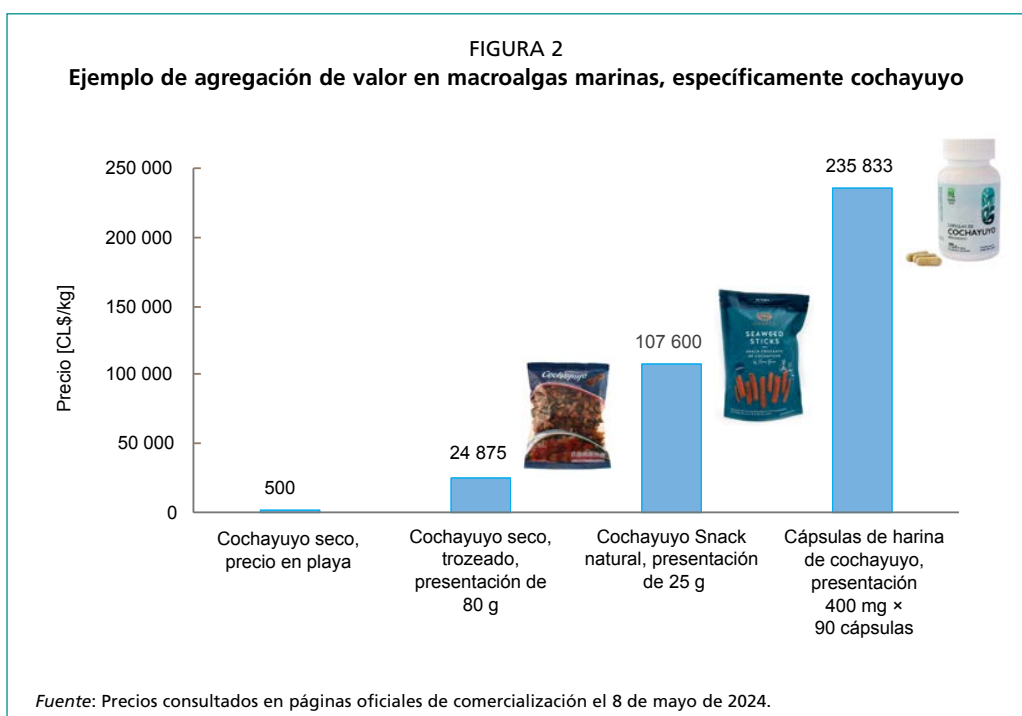
CUADRO 7

Precio pagado por intermediarios a recolectores de macroalgas en la comuna de Corral, Chile

Producto	Precio en pesos chilenos (CL\$/kg)*
Cochayuyo seco (<i>Durvillaea incurvata</i>)	500
Luga negra fresca (<i>Sarcothalia crispata</i>)	200
Luga negra seca (<i>Sarcothalia crispata</i>)	600
Luga corta seca (<i>Mazzaella laminarioides</i>)	500

Nota*: Un dólar estadounidense (USD) equivale a 915 pesos chilenos (CL\$). Fecha de consulta: 29 de agosto de 2024.

Fuente: Precio pagado en la playa por un intermediario del sector artesanal, consultado en abril de 2024.



La inocuidad es otro aspecto que debe monitorearse en el consumo de macroalgas, considerando los peligros alimentarios que derivan de sus características biológicas (metabolismo) y ambientales (crecimiento y procesamiento). Estos peligros se derivan en tres categorías: **(i) peligros químicos**, que incluyen altos niveles de metales pesados y yodo, residuos de pesticidas, presencia de radionucleidos, de contaminantes orgánicos persistentes, de alérgenos y biotoxinas; **(ii) peligros microbiológicos**, como bacterias patógenas, virus, biotoxinas, toxinas de dinoflagelados, y cianobacterias; y **(iii) peligros físicos**, asociados principalmente a la presencia de piezas metálicas provenientes de alguna etapa de la cadena de producción, así como trozos de vidrio, presencia de micro y nano plásticos y de pequeños crustáceos o invertebrados. Todos estos peligros pueden ser identificados, analizados, monitorizados e incluso mitigados, siguiendo los procedimientos adecuados, con el fin de evitar riesgos a la salud del consumidor final (FAO y OMS, 2022).

Propiedades sensoriales

En los países donde el consumo de macroalgas no está generalizado, las propiedades sensoriales (textura, olor, sabor) constituyen una barrera significativa para su adopción. Estas propiedades determinan la palatabilidad del producto final y, en consecuencia, la disposición de las personas a consumir estos alimentos (McCrickerd y Forde, 2016). En general, los aspectos sensoriales representan el mayor desafío tanto para incorporar macroalgas a la dieta como para aumentar el contenido de macroalgas en productos procesados (Gullón *et al.*, 2021). Los estudios indican límites máximos específicos para la incorporación de macroalgas en alimentos farináceos: 10 % en fideos, 4 % en pan, 5 % en productos de repostería, como galletas, menos del 10 % en pastelería y 3,55 % en extruidos de maíz (Quitral *et al.*, 2022).

A lo anterior se suma el fenómeno de la neofobia alimentaria, que es la actitud de rechazo a probar alimentos nuevos o desconocidos, lo que limita también la posibilidad de éxito al ofrecer productos a base de macroalgas en poblaciones poco acostumbradas a su consumo (Barrena y Sánchez, 2013; Moss y McSweeney, 2021). A pesar de todo, la promoción de atributos positivos, como ser un alimento natural y saludable, puede ayudar a superar esta barrera (Losada-Lopez, Dopico y Faína-Medín, 2021).

Aspectos para una industria sostenible

Las macroalgas se perfilan como una importante fuente de biomasa comestible para garantizar la seguridad alimentaria en el futuro. Esto se debe a su posición estratégica en la cadena trófica, su rápido crecimiento, sus propiedades nutricionales y saludables y su disponibilidad global (FAO, 2020; Chen *et al.*, 2024).

Según lo descrito por Parada, Pérez-Correa y Pérez-Jiménez (2019), para desarrollar una industria de macroalgas sostenible se deben considerar cuatro aspectos fundamentales: (i) investigación básica sobre la biología y química de las macroalgas para diseñar sistemas de acuicultura ecológicamente adecuados y rentables, aprovechando el potencial comercial de cada especie; (ii) investigación del procesamiento poscosecha para obtener ingredientes con características óptimas, incluyendo tecnologías de extracción, purificación y microencapsulación; (iii) investigación en tecnología de alimentos, abarcando formulación y procesamiento, vida útil y aspectos sensoriales; y (iv) estudios nutricionales específicos, ya que el conocimiento de la composición no es suficiente para respaldar declaraciones sobre propiedades saludables cuando se busca desarrollar alimentos para la salud.

Uso culinario de macroalgas en América Latina

América Latina posee una rica tradición en el uso culinario de macroalgas, especialmente en las comunidades costeras. Esta tradición se manifiesta de dos formas: a través de platos típicos arraigados en la cultura y forma de vida local, y mediante recetas tradicionales que han incorporado macroalgas como ingrediente, conocidas como “adaptaciones culinarias” (Espinoza-Avalos, 1995). Estas preparaciones no solo forman parte de la memoria e identidad cultural de las comunidades sino que también representan un valor significativo en el ámbito socioeconómico asociados, particularmente en el turismo.

En Chile, el consumo de macroalgas se ha centrado principalmente en tres especies: el cochayuyo (*Durvillaea antarctica/incurvata*), el luche rojo (*Porphyra columbina*) y el luche verde (*Ulva lactuca*). Este consumo está estrechamente vinculado a los pueblos originarios, con evidencia documentada del uso de cochayuyo por comunidades mapuche desde la época precolombina hasta la actualidad (de Mösbach, 1992). Hoy en día, encontramos diversos alimentos preparados con macroalgas, cuyo uso se está revalorizando como patrimonio sociocultural y nutricional (Aedo Bustos, 2023). Un estudio reciente de Segovia, Benavides y Valdés (2024), basado en un trabajo de campo con recolectores de macroalgas en la Región de Los Ríos, al sur de Chile, documenta varias preparaciones que forman parte de la memoria y cultura de la cocina tradicional a base de macroalgas. Entre estas preparaciones se mencionan:

- Ceviche de cochayuyo (*Durvillaea incurvata*), en donde se reemplaza la carne de pescado por el alga.
- Empanadas de luche (*Porphyra columbina*), donde se usa el alga como relleno principal,
- Pebre de luche, que corresponde a una preparación fría para acompañar pan.
- Pastel de cochayuyo, que es una preparación horneada a base de papas donde el alga se incluye como relleno.
- Otras.

Estas recetas tradicionales que incluyen principalmente guisos demuestran la gran versatilidad de las macroalgas comúnmente utilizadas. Sin embargo, también revelan que se aprovechan un número limitado de especies, lo cual abre oportunidades tanto para consolidar el uso de las especies ya explotadas como para explorar el potencial de otras menos conocidas.

Perú también ofrece una larga historia de consumo de macroalgas. Como describe Gil-Kodaka (2018), en épocas inca y preinca las macroalgas eran consideradas alimentos sagrados y medicinales, siendo la especie más común *Porphyra columbina*.

Para preservarlas y consumirlas, las macroalgas se sometían a diversos procesos: deshidratación, cocción, tostado y reducción a harinas. También se obtenían líquidos estables como vinagres y chicha (bebida típica andina).

En la actualidad, aunque el Perú cuenta con más de 250 especies de macroalgas, solo se utilizan algunas especies rojas como *Chondracanthus chamissoi* (yuyo), *Neorubra decipiens* (Piscuchaqui) y *Porphyra columbina* (conocida coloquialmente como cochayuyo). También se aprovecha un alga verde, *Ulva* spp. (lechuga de mar y de río), mientras que las macroalgas pardas no se emplean en la alimentación (Avila-Peltroche y Padilla-Vallejos, 2020). Entre los platos que se preparan con estas macroalgas tenemos:

- Ceviche, donde se usa yuyo para acompañar el pescado marinado.
- Ensalada de cochayuyo con vegetales.
- Arroz mixto con lechuga de río.
- Tortilla con lechuga de río.
- Otros.

Al igual que en Chile, el número de macroalgas usadas como alimento es limitado, aunque estas especies resultan ser versátiles para la elaboración de distintos productos.

El consumo de macroalgas ha sido promovido en otros países de América Latina, aunque con menos arraigo cultural. En el Ecuador, por ejemplo, se ha estudiado la incorporación de harina del alga parda *Undaria pinnatifida* en la dieta de pobladores de Quito, donde tradicionalmente no se consumía macroalgas. En las islas del Caribe, específicamente en Santa Lucía y Jamaica, se cultivan diferentes especies del alga roja *Gracilaria*, que se consumen en forma de extractos en una bebida tradicional llamada “seamoss”, rica en fibra dietética (Freile Pelegrín, 2014; González-González, 1987). En México, a pesar de su gran biodiversidad, las macroalgas se destinan principalmente a la extracción de polisacáridos y la producción de fertilizantes, alimentación animal y productos cosméticos, más que al consumo humano directo o mínimamente procesado (Vázquez-Delfín *et al.*, 2019).

En conclusión, América Latina cuenta con regiones que mantienen una sólida tradición en el consumo de macroalgas como alimentos, aunque esta se basa en el aprovechamiento de un número reducido de especies altamente versátiles (Espinoza-Avalos, 1995).

CONCLUSIONES

Las macroalgas constituyen un grupo importante y diverso de biomasa con potencial para generar alimentos de alto valor nutricional y saludable. Sin embargo, debido a limitaciones sensoriales y la presencia de compuestos indeseables, como metales pesados y sodio, los extractos para obtener compuestos específicos presentan mayores oportunidades de mercado. Sus nutrientes y compuestos bioactivos son fundamentales para el desarrollo de nuevos productos que contribuyen a la seguridad alimentaria. Diversos aspectos tecnológicos, como optimizar las propiedades sensoriales y asegurar la bioactividad, son cruciales para el éxito de estos alimentos.

En América Latina, el uso principal sigue siendo la obtención de hidrocoloides para alimentos, aunque estos alcancen valores de mercado inferiores comparados con otros usos. No obstante, en algunas zonas existe una sólida tradición de consumo directo de macroalgas, aprovechando pocas especies pero muy versátiles. Si bien existen iniciativas para diversificar y masificar su consumo, modificar los hábitos alimentarios representa un desafío significativo.

En cuanto a volúmenes, América Latina representa actualmente una fracción menor de la producción mundial de macroalgas concentrada en pocos países (principalmente Chile) y con una limitada producción a base de cultivos. Esto indica un amplio margen para crecer tanto en volumen como en valorización. El desarrollo de un modelo más robusto que priorice la acuicultura, la obtención de productos con valor agregado

y la diversificación, podría dinamizar la economía de las comunidades que explotan este recurso, además de contribuir a la seguridad alimentaria mediante un mejor aprovechamiento de los compuestos de alto valor que nos ofrecen las macroalgas.

REFERENCIAS

- Aedo Bustos, J.I. 2023. *Nutrición científica y patrimonio alimentario en Chile: contribuciones para un encuentro interdisciplinar en torno a las algas en el centro sur de Chile*. Universidad de Concepción. <https://repositorio.udec.cl/handle/11594/11232>
- Alemañ, A.E., Robledo, D. y Hayashi, L. 2019. Development of seaweed cultivation in Latin America: current trends and future prospects. *Phycologia*, 58(5): 462–471. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1640996>
- Alongi, M. y Anese, M. 2021. Re-thinking functional food development through a holistic approach. *Journal of Functional Foods*, 81: 104466. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104466>
- Arias-Echeverri, J.P., Zapata-Ramírez, P.A., Ramírez-Carmona, M., Rendón-Castrillón, L. y Ocampo-López, C. 2022. Present and Future of Seaweed Cultivation and Its Applications in Colombia. *J. Mar. Sci. Eng.*, 10: 243. <https://doi.org/10.3390/jmse10020243>
- Avila-Peltroche, J. y Padilla-Vallejos, J. 2020. The seaweed resources of Peru. *Botánica Marina*, 63(4): 381–394. <https://doi.org/10.1515/bot-2020-0026>
- Barrena, R. y Sánchez, M. 2013. Neophobia, Personal Consumer Values and Novel Food Acceptance. *Food Qual. Prefer.*, 27(1): 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2012.06.007>
- Cai, J., Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Cornish, L., Dabbadie, L., Desrochers, A., Diffey, S., Garrido Gamarro, E., Geehan, J., Hurtado, A., Lucente, D., Mair, G., Miao, W., Potin, P., Przybyla, C., Reantaso, M., Roubach, R., Tauati, M. y Yuan, X. 2021. *Seaweeds and microalgae: an overview for unlocking their potential in global aquaculture development*. FAO Fisheries and Aquaculture Circular No. 1229. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb5670en>
- Camurati, J.R., Hocsmán, J. y Salomone, V.N. 2020. Potentialities of Argentine marine macroalgae. *Marine and Fishery Sciences (MAFIS)*, 32(2): 169–183. <https://doi.org/10.47193/mafis.3222019121907>
- Cavallo, G., Lorini, C., Garamella, G. y Bonaccorsi, G. 2021. Seaweeds as a “Palatable” Challenge Between Innovation and Sustainability: A Systematic Review of Food Safety. *Sustainability*, 13(14): 7652. <https://doi.org/10.3390/su13147652>
- Chen, Z., Zhang, L., Liu, Y., Wen, Y., Shan, S. y Zhao, C. 2024. Seaweed as a sustainable future food source. *Int J Food Sci Technol*, 59: 1237–1247. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16910>
- CIBAS (Centro de Investigación en Biodiversidad y Ambientes Sustentables). 2017. *Evaluación de la viabilidad de apertura del mercado de la Unión Europea para productos derivados de macroalgas extraídas en Chile destinados al consumo humano, como alternativa de diversificación productiva para la pesca artesanal, considerando las barreras impuestas por la UE para “novel food”. Caso de Estudio: (Durvillaea antarctica)*. Informe final corregido CUI 2016-29-DDP-4. https://www.subpesca.cl/portal/618/articles-99354_documento.pdf
- Cornish, M.L., Critchley, A.T. y Mouritsen, O.G. 2017. Consumption of seaweeds and the human brain. *J Appl Phycol*, 29: 2377–2398. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-1049-3>
- D’Armas, H., Jaramillo-Jaramillo, C., D’Armas, M. y Ordaz-González, G.J. 2023. Fatty acid profile, total phenolic content and antioxidant capacity of seaweeds in Salinas Bay, Ecuador. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 58(2): 128–136. <https://doi.org/10.22370/rbmo.2023.58.2.4238>

- D'Armas, H., Jaramillo, C., D'Armas, M., Echavarría, A. y Valverde, P. 2019. Proximate composition of several macroalgae from the coast of Salinas Bay, Ecuador. *Revista de Biología Tropical*, 67(1): 61–68. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v67i1.33380>
- Das, P., Khan, S., Chaudhary, A.K., AbdulQuadir, M., Thaher, M.I. y Al-Jabri, H. 2019. *Potential Applications of Algae-Based Bio-fertilizer*. En: Giri, B., Prasad, R., Wu, Q.S., Varma, A. (eds.). *Biofertilizers for Sustainable Agriculture and Environment*. Soil Biology, Vol. 55. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18933-4_3
- De Mösbach, E.W. 1992. *Botánica indígena de Chile*. Editorial Andrés Bello. <https://fundacionphilippi.cl/wp-content/uploads/2023/05/Botánica-indígena-Ernesto-Wilhelm-de-Moesbach.pdf>
- De Oliveira, M.N., Freitas, A.L.P., Carvalho, A.F.U., Sampaio, T.M.T., Farias, D.F., Teixeira, D.I.A., Gouveia, S.T. y Pereira, J.G. 2009. Nutritive and non-nutritive attributes of washed-up seaweeds from the coast of Ceará, Brazil. *Food Chem*, 115: 254–259. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.12.004>
- Dillehay, T.D., Ramírez, C., Pino, M., Collins, M.B., Rossen, J. y Pino-Navarro, J.D. 2008. Monte Verde: Seaweed, Food, Medicine, and the Peopling of South America. *Science*, 320(5877): 784–786. <https://doi.org/10.1126/science.1156533.18467586>
- Espinoza-Avalos, J. 1995. Algas marinas como alimento humano en Latinoamérica y el Caribe. *AvaCient*, 14: 3–12. https://www.researchgate.net/publication/289377548_Algas_marinas_como_alimento_humano_en_Latinoamerica_y_el_Caribe#full-text
- FAO. 2020. *Fishery and Aquaculture Statistics*. Global Aquaculture Production 1950–2018 (FishstatJ) (Updated 22 July 2020). https://www.fao.org/fishery/statistics-query/en/global_production/global_production_quantity
- FAO. 2024. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 – Blue Transformation in action*. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
- FAO y OMS. 2022. *Report of the expert meeting on food safety for seaweed – Current status and future perspectives*. Rome, 28–29. October 2021. Food Safety and Quality Series No. 13. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc0846en>
- Freile Pelegrín, Y. 2014. ¡Coma frutas y verduras... y también algas marinas! En C2 Ciencia y Cultura. Merida (México). [Consultado el 19 de febrero de 2025]. <https://www.revistac2.com/coma-frutas-y-verduras-algas/>
- Fundación Chile. 2018. *Informe Final “Estudio de prospección de mercado de bioproductos a partir de recursos marinos de la Región de Coquimbo” - Proyecto 16BPER 67032*. <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/12/informe-prospeccion-de-mercado.pdf>
- García, V., Uribe, E., Vega-Gálvez, A., Delporte, C., Valenzuela-Barra, G., López, J. y Pastén, A. 2020. Health-promoting activities of edible seaweed extracts from Chilean coasts: assessment of antioxidant, anti-diabetic, anti-inflammatory and antimicrobial potential. *Revista chilena de nutrición*, 47(5): 792–800. <https://dx.doi.org/10.4067/s0717-75182020000500792>
- Gil-Kodaka, P. 2018. *The seaweeds of Peru and its status in Research and Applications*. https://www.researchgate.net/profile/Patricia-Gil-Kodaka/publication/335925554_The_seaweeds_of_Peru_and_its_status_in_Research_and_Applications/links/5d841760299bf1996f7e4332/The-seaweeds-of-Peru-and-its-status-in-Research-and-Applications.pdf
- González-González, J. 1987. Las algas de México. En *Revista de cultura científica Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México*. Ciudad de México (México). [Consultado el 19 de febrero de 2025]. <https://www.revistacienciasunam.com/pt/153-revistas/revista-ciencias-10/1307-las-algas-de-m%C3%A9xico.html>
- Guerrero-Wyss, M., Yans, C., Boscán-González, A., Duran, P., Parra-Soto, S. y Angarita, L. 2023. *Durvillaea antarctica*: A Seaweed for Enhancing Immune and Cardiometabolic Health and Gut Microbiota Composition Modulation. *Int. J. Mol. Sci.*, 24, 10779. <https://doi.org/10.3390/ijms241310779>

- Gullón, B., Gagaoua, M., Barba, F.J., Gullón, P., Zhang, W. y Lorenzo, J.M. 2020. Seaweeds as Promising Resource of Bioactive Compounds: Overview of Novel Extraction Strategies and Design of Tailored Meat Products. *Trends Food Sci. Technol.*, 100: 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.039>
- Gullón, P., Astray, G., Gullón, B., Franco, D., Campagnol, P.C.B. y Lorenzo, J.M. 2021. Inclusion of Seaweeds as Healthy Approach to Formulate New Low-Salt Meat Products. *Curr. Opin. Food Sci.*, 40: 20–25. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.05.005>
- Häder, D.P. 2021. *Phycocolloids from macroalgae*. En: Natural Bioactive Compounds, Academic Press, pp. 187–201. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820655-3.00009-4>
- Hernández-Cruz, K., Jimenez-Martinez, C., Perucini-Avendano, M., Mateo Cid, L.E., Perea-Flores, M. D.J., Gutiérrez-López, G.F. y Davila-Ortiz, G. 2022. Chemical and microstructural characterization of three seaweed species from two locations of Veracruz, Mexico. *Food Science and Technology*, 42, e41421. <https://doi.org/10.1590/fst.41421>
- Hess, J.M., Jonnalagadda, S.S. y Slavin, J.L. 2016. What Is a Snack, Why Do We Snack, and How Can We Choose Better Snacks? A Review of the Definitions of Snacking, Motivations to Snack, Contributions to Dietary Intake, and Recommendations for Improvement. *Adv. Nutr.*, 7(3): 466–475. <https://doi.org/10.3945/an.115.009571>
- Koch, J.I., Burg, S.W.K. van den, Nauta, R.W., Werf, A.K. van den. 2021. *The Role of Seaweed in the Future Food System: the Potential of Dutch Parties in This Young Sector*. Report to the Dutch Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality. <https://edepot.wur.nl/560290>
- Kumari, P., Kumar, M., Gupta, V., Reddy, C.R.K. y Jha, B. 2010. Tropical marine macroalgae as potential sources of nutritionally important PUFAs. *Food Chemistry*, 120(3): 749–757. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.11.006>
- Lomartire, S. y Gonçalves, A.M.M. 2023. Algal Phycocolloids: Bioactivities and Pharmaceutical Applications. *Marine Drugs*, 21(7): 384. <https://doi.org/10.3390/md21070384>
- Losada-Lopez, C., Dopico, D.C. y Faína-Medín, J.A. 2021. Neophobia and Seaweed Consumption: Effects on Consumer Attitude and Willingness to Consume Seaweed. *Int. J. Gastron. Food Sci.*, 24: 100338. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100338>
- Lu, L.W. y Chen, J.H. 2022. Seaweeds as Ingredients to Lower Glycemic Potency of Cereal Foods Synergistically—A Perspective. *Foods*, 11(5): 714. <https://doi.org/10.3390/foods11050714>. 35267347
- McCrickerd, K. y Forde, C.G. 2016. Sensory Influences on Food Intake Control: Moving Beyond Palatability. *Obes. Rev.*, 17: 18–29. <https://doi.org/10.1111/obr.12340>
- Mohamed, S., Hashim, S.N., y Rahman, H.A. 2012. Seaweeds: A sustainable functional food for complementary and alternative therapy. *Trends in Food Science & Technology*, 23(2): 83–96. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.09.001>
- Moss, R. y McSweeney, M. B. 2021. Do Consumers Want Seaweed in Their Food? A Study Evaluating Emotional Responses to Foods Containing Seaweed. *Foods*, 10 (11): 2737. <https://doi.org/10.3390/foods10112737>
- Murai, U., Yamagishi, K., Kishida, R. y Iso, H. 2021. Impact of seaweed intake on health. *Eur. J. Clin. Nutr.*, 75(6): 877–889. <https://doi.org/10.1038/s41430-020-00739-8>
- Ortiz, J., Romero, N., Robert, P., Araya, J., Lopez-Hernández, J., Bozzo, C., Navarrete, E., Osorio, A. y Rios, A. 2006. Dietary fiber, amino acid, fatty acid and tocopherol contents of the edible seaweeds *Ulva lactuca* and *Durvillaea antarctica*. *Food Chem.*, 99: 98–104. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.07.027>
- Ortiz, J., Uquiche, E., Robert, P., Romero, N., Quitral, V. y Llantén, C. 2009. Functional and nutritional value of the Chilean seaweeds *Codium fragile*, *Gracilaria chilensis* and *Macrocystis pyrifera*. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, 111: 320–327. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200800140>

- Parada, J., Pérez-Correa, J.-R. y Pérez-Jiménez, J. 2019. Design of Low Glycemic Response Foods Using Polyphenols from Seaweed. *J. Funct. Foods*, 56: 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.03.004>
- Peñalver, R., Lorenzo, J.M., Ros, G., Amarowicz, R., Pateiro, M. y Nieto, G. 2020. Seaweeds as a functional ingredient for a healthy diet. *Marine Drugs*, 18(6), 301. <https://doi.org/10.3390/md18060301>
- Pérez-Lloréns, J.L. 2019. Seaweed Consumption in the Americas. *Gastronomica*, 19(4): 49–59. <https://doi.org/10.1525/gfc.2019.19.4.49>
- Potter, M., Vlassopoulos, A. y Lehmann, U. 2018. Snacking Recommendations Worldwide: A Scoping Review. *Adv. Nutr.*, 9 (2), 86–98. <https://doi.org/10.1093/advances/nmx003>
- Quitral, V., Morales, C., Sepúlveda, M. y Schwartz, M. 2012. Propiedades nutritivas y saludables de algas marinas y su potencialidad como ingrediente funcional. *Revista chilena de nutrición*, 39(4): 196–202. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182012000400014>
- Quitral, V., Sepúlveda, M., Gamero-Vega, G. y Jiménez, P. 2022. Seaweeds in bakery and farinaceous foods: A mini review. *Int. J. Gastron. Food Sci.*, 28, Article 100403. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100403>
- Rengasamy, K.R., Mahomoodally, M.F., Aumeeruddy, M.Z., Zengin, G., Xiao, J. y Kim, D.H. 2020. Bioactive Compounds in Seaweeds: An Overview of Their Biological Properties and Safety. *Food Chem. Toxicol.*, 135: 111013. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.111013>
- Segovia, P., Benavides, C. y Valdés, C. 2024. *Familias recolectoras de algas de la región de Los Ríos: Conversaciones con gente de mar*. ISBN 978-956-418-096-0. Editado por Avutarda Ediciones. Valdivia, Chile. <http://biblioteca.literaturalosrios.cl/items/show/1360>
- Shannon, E. y Abu-Ghannam, N. 2019. Seaweeds as Nutraceuticals for Health and Nutrition. *Phycologia*, 58 (5): 563–577. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1640533>
- Souza, B.W.S., Cerqueira, M.A., Martins, J.T., Quintas, M.A.C., Ferreira, A.C.S. y Teixeira, J.A. 2011. Antioxidant potential of two red seaweeds from the Brazilian coasts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(10): 5589–5594. <https://doi.org/10.1021/jf200999n>
- Vázquez-Delfín, E., Freile-Pelegrín, Y., Pliego-Cortés, H. y Robledo, D. 2019. Seaweed resources of Mexico: current knowledge and future perspectives. *Botanica Marina*, 62(3): 275–289. <https://doi.org/10.1515/bot-2018-0070>
- Vilas-Boas, A.A., Pintado, M. y Oliveira, A.L. 2021. Natural bioactive compounds from food waste: Toxicity and safety concerns. *Foods*, 10(7): 1564. <https://doi.org/10.3390/foods10071564>
- Vilcanqui, Y., Mamani-Apaza, L.O., Flores, M., Ortiz-Viedma, J., Romero, N., Mariotti-Celis, M.S. y Huamán-Castilla, N.L. 2021. Chemical Characterization of Brown and Red Seaweed from Southern Peru, a Sustainable Source of Bioactive and Nutraceutical Compounds. *Agronomy*, 11: 1669. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081669>
- Webb, P., Somers, N.K. y Thilsted, S.H. 2023. Seaweed's contribution to food security in low-and middle-income countries: Benefits from production, processing and trade. *Global Food Security*, 37: 100686. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2023.100686>
- Woodgate, S.L. y Van der Veen, J.T. 2014. *Fats and Oils—Animal Based*. In *Food Processing: Principles and Applications*; Clark, S., Jung, S., Lamsal, B., eds.; 2nd ed.; John Wiley & Sons; pp. 481–499. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.04.016>

Estado actual y retos del marco regulatorio para el cultivo de macroalgas en América Latina

José Avila-Peltroche

Carnegie Science

California, Estados Unidos de América

Ávila-Peltroche, J. 2025. *Estado actual y retos del marco regulatorio para el cultivo de macroalgas en América Latina*. En: Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Murúa Andrade, P. y Farías Molina, A. (coords.). *Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina*. Taller Técnico Regional de la FAO. 24-26 de junio de 2024, Puerto Varas, Chile. *FAO Actas de Pesca y Acuicultura*. N.º 74. Roma, FAO. pp. 49-66.

RESUMEN

La producción de macroalgas en América Latina es mínima, a pesar del potencial de la región para su cultivo y su larga tradición en el consumo de algas. Un factor clave para impulsar esta industria es contar con un marco legal adecuado, aspecto que ha recibido poca atención. Este documento revisa dicho marco regulatorio desde un enfoque holístico para identificar dificultades y oportunidades de mejora. El panorama regulatorio revela una diversidad de enfoques y niveles de desarrollo: de los 17 países evaluados, solo cuatro (el Brasil, Chile, el Ecuador y la República Bolivariana de Venezuela) cuentan con legislaciones específicas para el cultivo de macroalgas. A nivel regional, existen deficiencias significativas en áreas clave como la aplicación del enfoque ecosistémico, bancos de germoplasma, incentivo a largo plazo, acuicultura multitrófica integrada (AMTI), la gestión del espacio marino y aspectos sociales. Un análisis detallado permitió clasificar los países en cuatro grupos según sus legislaciones. Este documento detalla las principales ventajas y puntos críticos de cada grupo. Por último, se presentan recomendaciones en base al análisis realizado con el fin de impulsar una industria de macroalgas sostenible, equitativa y resiliente en América Latina.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de macroalgas ha cobrado relevancia mundial en las últimas décadas debido a los usos actuales y potenciales que poseen estos organismos, así como a los servicios ecosistémicos que proveen (FAO, 2023a). En la actualidad, el 97 % de las algas producidas provienen del cultivo, el cual se concentra en países del este asiático (China y Corea del Sur) y sudeste asiático (Indonesia y Filipinas). Alrededor del 95 % de dicha producción se concentra en los géneros de algas pardas como *Undaria* y *Laminaria/Saccharina*, y de algas rojas como *Gracilaria*, *Porphyra/Pyropia* y *Kappaphycus/Eucheuma*. En contraste, la producción de algas verdes es reducida, limitada a géneros como *Caulerpa* en los trópicos y representando el 0,07 % del total de algas marinas cultivadas (FAO, 2023a; Banco Mundial, 2023).

Fuera de Asia, la producción de macroalgas a nivel comercial ha sido limitada, aunque diversas iniciativas se están expandiendo en áreas como América el Norte y Europa. En esta última región, el cultivo de macroalgas se ha considerado un pilar

de su estrategia de bioeconomía azul. América Latina se ha sumado a esta tendencia, especialmente porque sus largas líneas costeras y Zonas Económicas Exclusivas tienen el potencial para el cultivo de estos organismos (Banco Mundial, 2023). No obstante, esta región tan solo contribuye al 0,1 % de la producción mundial y ha experimentado un lento crecimiento con respecto a los volúmenes producidos (Wurmann, Soto y Norambuena, 2022). Cabe destacar que el consumo de macroalgas no es algo nuevo en América Latina. De hecho, el registro más antiguo del uso de algas en la dieta humana proviene de Monte Verde (Chile), una tradición que continúa presente en la gastronomía de varios países de la región (Dillehay *et al.*, 2008; Hayashi *et al.*, 2017; Pérez-Lloréns, 2019).

La promoción y el desarrollo del cultivo de macroalgas enfrenta diversos retos a nivel mundial. La gobernanza destaca como elemento clave para generar una base sólida en esta actividad y generar confianza para la inversión en el sector. Por ello es esencial contar con leyes, normas y directrices fundamentadas en la ciencia y la evidencia (FAO, 2023a). Este aspecto ha sido analizado en detalle en países de Asia y Europa, llevando a propuestas de políticas que incentiven esta industria “global” emergente y promuevan un equilibrio sostenible entre el crecimiento económico y la salud de los océanos (Cottier-Cook *et al.*, 2016; Frank, 2020). En América Latina, los aspectos legales relacionadas al cultivo de macroalgas han recibido poca atención, limitándose a pocos países de la región y a ciertos puntos específicos de la legislación (Méndez *et al.*, 2023). En este sentido, el presente documento revisa los aspectos del marco regulatorio que rige el cultivo de macroalgas en América Latina, con el fin de identificar las dificultades normativas y de gobernanza actuales, así como destacar los potenciales puntos de mejora.

El marco regulatorio para el cultivo de macroalgas en América Latina

Búsqueda y criterios de evaluación del marco regulatorio

La información sobre el marco regulatorio del cultivo de macroalgas en América Latina se obtuvo a través de:

- Las visiones generales de las legislaciones acuícolas nacionales proporcionadas por la FAO (2024) (Apéndice 1).
- La base de datos FAOLEX (FAO, 2020).
- Los marcos legislativos recopilados por Méndez *et al.* (2023).
- La comunicación directa con especialistas de la región.

Se categorizaron los países en base a dos criterios principales:

- La existencia de legislaciones específicas para el cultivo de macroalgas, tanto a nivel nacional o regional.
- La inclusión explícita de las algas en la definición de acuicultura en sus marcos regulatorios.

Las legislaciones recopiladas sobre el cultivo de macroalgas, tanto directas como indirectas, se evaluaron en base a 10 criterios según lo propuesto por Cottier-Cook *et al.* (2016) y complementados con aspectos señalados por Hodgson (2023):

- Criterio 1: Enfoque ecosistémico de la ley, ya sea general o específica para macroalgas.
- Criterio 2: Establecimiento de centros de investigación de excelencia para desarrollar o mejorar cultivos con especies autóctonas, y caracterizar y diagnosticar enfermedades.
- Criterio 3: Establecimiento de bancos de semillas o germoplasma para mantener una existencia saludable de las mismas y mantener cepas que sean resistentes a enfermedades o factores abióticos.

CUADRO 1
Sistema de puntuación utilizado para evaluar los marcos regulatorios sobre el cultivo de macroalgas en los países de América Latina

Puntuación	Descripción
0	No se hace mención
1	Se menciona de manera superficial o parcial en la legislación acuícola nacional o regional
2	Se menciona de manera detallada o precisa en la legislación acuícola nacional o regional
3	Se menciona de manera superficial o parcial en la legislación específica sobre el cultivo de macroalgas
4	Se menciona de manera detallada o precisa en la legislación específica sobre el cultivo de macroalgas

- Criterio 4: Mantenimiento de la diversidad genética de los bancos naturales mediante la prevención de la introducción de especies no nativas y promoción de la acuicultura con especies autóctonas del país.
- Criterio 5: Aplicación del principio precautorio al introducir una especie nueva o no nativa.
- Criterio 6: Desarrollo y mejora de programas de bioseguridad mediante la creación de capacidades y el fomento de diagnósticos rápidos de enfermedades.
- Criterio 7: Fomento de la inversión a largo plazo mediante políticas que protejan la industria en caso de desastres naturales o brotes de enfermedades.
- Criterio 8: Promoción de la AMTI.
- Criterio 9: Desarrollo de herramientas para evaluar la gestión de espacio marino, facilitando el proceso de permisos o licencias y futuras inversiones.
- Criterio 10: Aspectos sociales relacionados con los derechos y condiciones de trabajo de los acuicultores.

Si bien estos criterios tienen implicancias que van más allá de aspectos meramente técnicos y prácticos del marco legislativo, el enfoque holístico que plantean (que incluye aspectos ecológicos, sociales y económicos) sirve para establecer un manejo sostenible a largo plazo de la industria de macroalgas (Frank, 2020). Para facilitar la detección de dificultades normativas y de gobernanza actuales, así como destacar potenciales puntos de mejora, cada criterio recibió una puntuación en base a su mención, superficial o detallada, en la legislación acuícola general o específica para macroalgas (Cuadro 1).

Panorama general del marco regulatorio para el cultivo de macroalgas en América Latina

De los 17 países evaluados en el presente documento, solo cuatro (el Brasil, Chile, el Ecuador y la República Bolivariana de Venezuela) cuentan con legislaciones específicas para el cultivo de macroalgas. En el Brasil, la legislación permite el cultivo de macroalgas a nivel regional (Estados de Río de Janeiro, Sao Paulo y Santa Catarina) y se limita a una especie en concreto (*K. alvarezii*). Cabe resaltar que las regulaciones a nivel federal en este país son habitualmente genéricas, mientras que las legislaciones de cada Estado son más específicas según su contexto (Méndez *et al.*, 2023). El resto de los países en América Latina carecen de un marco regulatorio para el cultivo de macroalgas. De estos, únicamente México y Costa Rica consideran a la “flora acuática” dentro de sus definiciones de acuicultura (Figura 1).

Un análisis más detallado de las legislaciones permitió identificar los siguientes puntos críticos en América Latina:

- **La falta de consideración, de manera explícita, del enfoque ecosistémico (criterio 1).** Aunque algunas legislaciones mencionan términos como “sostenibilidad” o enfatizan el cuidado del ecosistema, el enfoque en cuestión engloba múltiples actividades (ambientales y sociales) que se integran para



promover una acuicultura que sea sostenible, equitativa y resiliente (FAO, 2010). Cabe destacar que incluso los países con legislaciones específicas para macroalgas no toman en cuenta el enfoque antes mencionado.

- **La nula o poca mención y promoción de los bancos de germoplasma (criterio 3).** El mantenimiento de existencias nativas es vital para el desarrollo de una acuicultura sostenible. Para el caso concreto de las macroalgas, este aspecto ha sido ignorado en la mayoría de las legislaciones, con excepción de Chile y la República Bolivariana de Venezuela.
- **El fomento de la acuicultura solo se centra en la promoción y no en la inversión a largo plazo (criterio 7).** Esta situación se justifica parcialmente porque la acuicultura de macroalgas es una actividad reciente en la mayoría de los países de América Latina, por lo que es lógico pensar que primero se necesitan incentivos fiscales y económicos para promover dicha actividad. No obstante, es importante reconocer que el éxito de esta actividad dependerá de su sostenibilidad en el tiempo, enfrentando desafíos como desastres naturales, brote de enfermedades o inestabilidad política. Hasta ahora no se han identificado mecanismos que aseguren la inversión a largo plazo, tanto en acuicultura en general como en el cultivo específico de macroalgas.
- **La (casi total) ausencia de la AMTI (criterio 8).** La aplicación de la AMTI en

los diferentes países de América Latina debe adaptarse a las necesidades de cada contexto socioambiental. Para implementar la AMTI en un país es importante analizar los lugares, procesos y especies que se planean utilizar. Aunque existen estudios que evalúan la viabilidad de esta técnica en países como Chile y el Perú (Camelo-Guarín, Molinet y Soto, 2021; Loayza-Aguilar *et al.*, 2023), la consideración de la AMTI sería valiosa para su implementación y regulación.

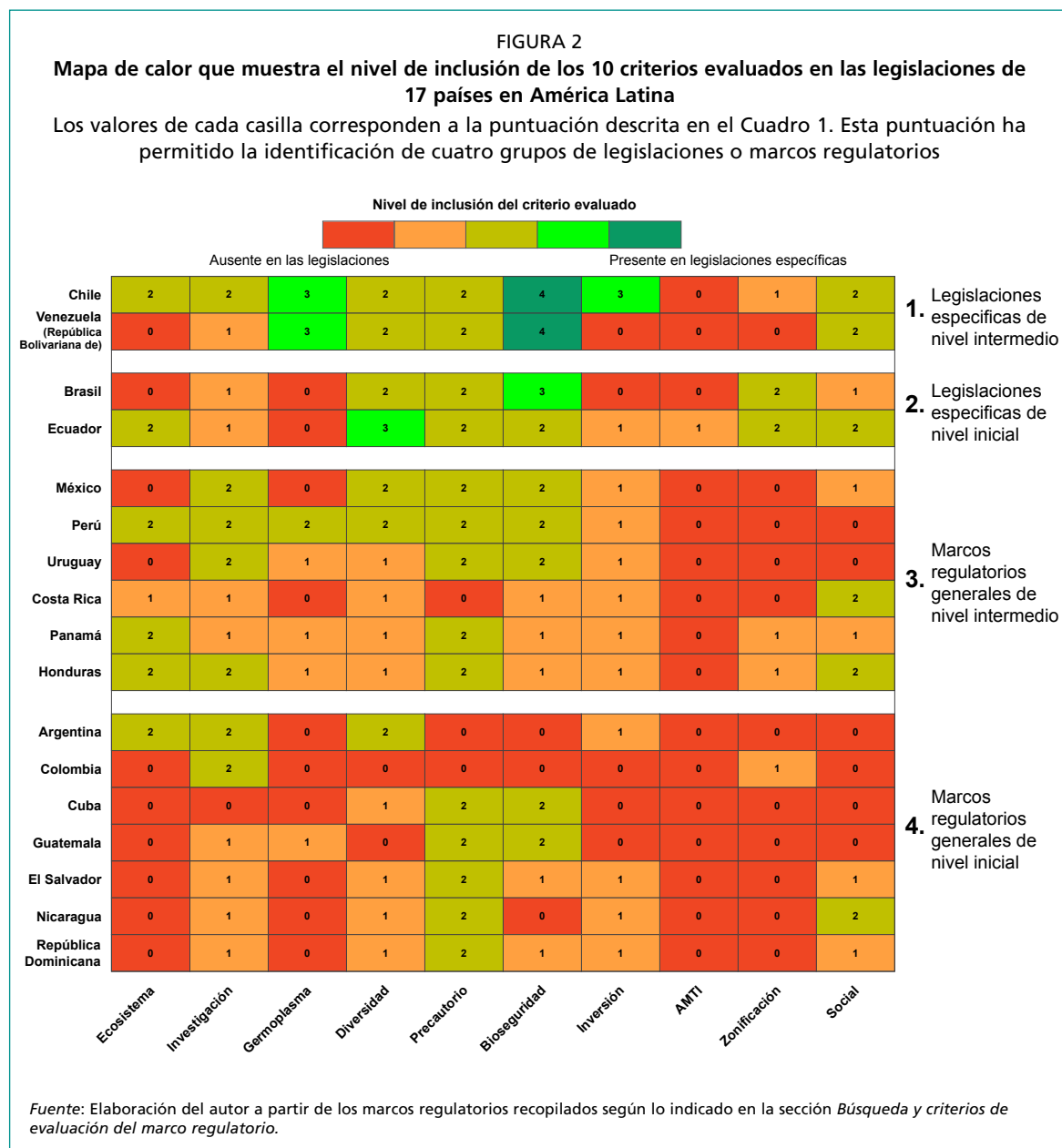
- **La falta o deficiente gestión del espacio marino (criterio 9).** Este aspecto es vital para poder ordenar la actividad acuícola con el fin de evitar conflictos relacionados al uso de áreas marinas y facilitar la coordinación entre los diferentes actores (Cottier-Cook *et al.*, 2016). En la mayoría de los países de América Latina, el ordenamiento del espacio marino está en fase de planeamiento o en proceso de implementación, lo que explica por qué su gestión no está contemplada en el marco regulatorio.
- **Los aspectos sociales están poco contemplados en la mayoría de las legislaciones (criterio 10).** Aunque la seguridad, los derechos de los trabajadores y otros aspectos sociales pueden estar cubiertos por otras legislaciones, es necesaria su inclusión explícita en el marco regulatorio acuícola. La mayoría de las normativas abordan superficialmente o, ignoran por completo, temas como la equidad de género, el rol de la mujer, la participación de comunidades indígenas y el trabajo infantil. Ninguna legislación específica para macroalgas contempla directamente estos temas. Incluir estos aspectos aseguraría una sostenibilidad social de la actividad acuícola (FAO, 2023b).

Es importante destacar que las legislaciones evolucionan según la demanda de la industria de macroalgas en cada país, los contextos socioambientales y las prioridades que cada gobierno define (FAO, 2023a, 2023b). La situación de los países en América Latina es muy diversa, por lo que es necesario abordar la temática de manera más específica, más allá de los puntos críticos generales identificados en las legislaciones. A partir del análisis de los criterios mencionados, se han identificado cuatro grupos importantes de legislaciones (Figura 2), cuyas ventajas y áreas de mejora se detallan a continuación.

Países con legislaciones específicas de nivel intermedio para el cultivo de macroalgas

Chile y la República Bolivariana de Venezuela destacan en la región por cultivar macroalgas desde hace más de tres décadas. Ambos países cuentan con legislaciones específicas y un marco regulatorio acuícola que permite el desarrollo de la industria algal. Sin embargo, en comparación con legislaciones fuera de América Latina, aún presentan deficiencias importantes que se analizarán más adelante.

Chile es considerado como el único país de América Latina que cuenta con cultivos de macroalgas (*Gracilaria chilensis*) a nivel comercial y con un manual de buenas prácticas (Vergara y Vásquez, 2021; Méndez *et al.*, 2023). La acuicultura de macroalgas marinas está contemplada explícitamente en la Ley General de Pesca y Acuicultura (Ley N.º 18892 y sus modificaciones) y reforzada con la Ley de la Bonificación para el Repoblamiento y Cultivo de Algas (Ley N.º 20925). Por otro lado, la República Bolivariana de Venezuela viene cultivando *K. alvarezii* desde 1996, aunque su introducción generó inquietudes sobre el impacto que tendría en el ecosistema local (Hayashi *et al.*, 2017). No obstante, la “Resolución que regula el aprovechamiento, cultivo y actividades conexas de las especies de algas y cianobacterias” (Gaceta Oficial N.º 42.787) permite la acuicultura no solo de *Kappaphycus*, sino también de otras 15 especies de macroalgas.



A continuación, se presentan las principales ventajas o puntos positivos de las legislaciones revisadas:

- **El manejo de semillas o cepas algales.** Aunque no hay una promoción explícita de bancos de germoplasma para algas, únicamente las legislaciones de Chile y la República Bolivariana de Venezuela mencionan este criterio en relación con las macroalgas. Es importante mencionar que La Estrategia Nacional de Biodiversidad (2017–2030) de Chile hace énfasis en la importancia de los bancos de germoplasma para la conservación de la diversidad genética (Ministerio del Medio Ambiente de Chile, 2015). Asimismo, la legislación venezolana enfatiza el correcto registro de las actividades de transporte y transferencia realizadas en cepas algales, así como el cumplimiento de medidas de bioseguridad en laboratorios que mantengan germoplasma algal (Gaceta Oficial N.º 42.787).
- **Asuntos de bioseguridad en macroalgas.** A nivel regional, Chile y la República Bolivariana de Venezuela son los países que cuentan con más legislaciones relacionadas con la bioseguridad en cultivos de macroalgas. Esto es comprensible dadas sus experiencias previas: Chile con enfermedades y pestes en organismos

acuáticos, y la República Bolivariana de Venezuela con la introducción de especies potencialmente dañinas para el ecosistema. No obstante, la legislación chilena parece no ser suficiente, ya que solo se limita a confinar las plagas en las áreas afectadas y no permiten una rápida respuesta ante introducciones imprevistas (Méndez *et al.*, 2023). Un aspecto positivo de la legislación venezolana es que establece periodos de cuarentena, no solo para algas importadas, sino también para aquellas autóctonas que sean transportadas desde su sitio original hasta otro dentro del país. Asimismo, hace énfasis en el descarte de patógenos, aunque no se detallan los análisis ni el tiempo requerido para realizar el diagnóstico de enfermedades (Gaceta Oficial N.º 42.787).

Un punto en el que difieren las legislaciones de los países en cuestión es la inversión en el sector algal. Mientras que la legislación venezolana no contempla estrategias para incentivar la inversión a largo plazo en temas de cultivo de macroalgas, Chile cuenta con la *Ley Crea Bonificación para el Repoblamiento y Cultivo de Algas* (Ley N.º 20.925, 2016) como principal instrumento para promover la acuicultura de macroalgas. Dicha Ley tiene como objetivo aumentar la biomasa algal de especies con importancia económica y ecológica mediante el establecimiento de un sistema de bonificación para los pescadores artesanales, organizaciones de pescadores artesanales y demás micro y pequeñas empresas (Gobierno de Chile, 2016, Art. 3). Sin embargo, es importante señalar que la ley no constituye un verdadero incentivo para la inversión a largo plazo, ya que limita el financiamiento a un máximo de tres veces por sector de repoblamiento o cultivo (Gobierno de Chile, 2016, Art. 5).

Los puntos críticos identificados en las legislaciones corresponden a:

- **Ausencia de la AMTI.** Cabe resaltar que el potencial de esta técnica a escala comercial es posible en la región de Los Lagos (Camelo-Guarín, Molinet y Soto, 2021).
- **Poca atención a la gestión del espacio marino.** El marco regulatorio de Chile contempla este aspecto de manera parcial en su legislación acuícola. Recientemente, la promulgación de la Política Oceánica Nacional de Chile (Gobierno de Chile, 2018) y el Programa Oceánico Nacional (Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile, 2023) han afianzado la gestión espacial marina, haciendo énfasis en mejorar el modelo de regulación y ordenamiento territorial de la acuicultura. Por otro lado, la gestión del espacio marino es un aspecto incipiente en la República Bolivariana de Venezuela (Delgado, Fernández y Yerena, 2021), por lo que no se contempla actualmente en la legislación concerniente a la acuicultura y, específicamente, macroalgas.

Países con legislaciones específicas de nivel inicial para el cultivo de macroalgas

Este grupo reúne al Brasil y al Ecuador, países con una nascente acuicultura de macroalgas, pero que poseen legislaciones específicas para su cultivo. No obstante, a diferencia del grupo anterior, los criterios abordados en dichas legislaciones son muy superficiales o se limitan a una sola especie, como en el caso del Brasil para *K. alvarezii*. Por otro lado, el marco regulatorio acuícola en ambos países contempla criterios que ayudarían a seguir promoviendo la industria de macroalgas.

El cultivo de macroalgas en el Brasil se restringe a dos especies: *Gracilaria birdiae*, nativa de las costas brasileñas; y *K. alvarezii*, introducida para minimizar la presión extractiva en los bancos naturales de la carragenofita nativa *Hypnea pseudomusciformis* (Simioni, Hayashi y Oliveira, 2019). La *Instrucción Normativa N.º 3* (Secretaría Especial de Acuicultura y Pesca, 2004) menciona a las algas dentro de la definición de acuicultura. No obstante, la única regulación específica para el cultivo de macroalgas es aquella promulgada para *K. alvarezii* que permite su cultivo en los Estados de Río de Janeiro, Sao Paulo y Santa Catarina (*Instrucción Normativa N.º 1*, IBAMA, 2020).

Esta misma especie es cultivada en el Ecuador, aunque a pequeña escala y aún de forma experimental (Montúfar-Romero *et al.*, 2023). A pesar de esto, la legislación de este país incluye la producción de macroalgas en su *Instructivo de la Normativa General para Promover y Regular la Producción Orgánica, Ecológica y Biológica en el Ecuador (Acuerdo Ministerial N.º 299, 2013)*. Asimismo, la *Ley Orgánica para el Desarrollo de la Acuicultura y Pesca (Registro Oficial N.º 187, 2020)* incorpora las algas dentro de su definición de acuicultura.

A continuación, se presentan las principales ventajas o puntos positivos en las legislaciones del Brasil y el Ecuador:

- **Preservación de la diversidad genética algal a través de métodos sostenibles de colecta o regulación de introducciones.** Tanto el Brasil como el Ecuador toman en cuenta la preservación de la diversidad genética, aunque con enfoques diferentes. La introducción de *K. alvarezii* y sus repercusiones ambientales en el Brasil impulsó la regulación de nuevas introducciones, aunque limitándose a la especie en cuestión (*Instrucción Normativa N.º 1, IBAMA, 2020*). En el caso del Ecuador, la preservación de la diversidad genética algal solo considera el uso de prácticas sostenibles de colecta, sin regular la introducción de especies (*Acuerdo Ministerial N.º 299, 2013*). Sin embargo, en el Ecuador se ha prohibido el uso de organismos genéticamente modificados (OGM) en la producción acuícola, así como la introducción de organismos que puedan alterar de manera irreversible el patrimonio genético natural (*Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca del Ecuador, 2013; Decreto N.º 362, 2022*).
- **Asuntos de bioseguridad en macroalgas (aunque enfocados solamente a *K. alvarezii*).** Como se ha mencionado, en ambos países el cultivo de esta alga roja ha tomado importancia a nivel nacional. Esto ha llevado a que el Brasil haya centrado sus medidas de bioseguridad para *K. alvarezii* en cuarentenas y certificación de nuevas introducciones (Méndez *et al.*, 2023). En el Ecuador, aunque las medidas de bioseguridad se refieren principalmente a la producción de animales acuáticos, el éxito a nivel piloto de *K. alvarezii* demanda estudios más detallados sobre la ficopatología de esta especie. En ambos casos, las legislaciones dan pie al desarrollo de medidas de bioseguridad en el sector acuícola algal (Montúfar-Romero *et al.*, 2023).
- **Políticas de gestión del espacio marino contempladas en las legislaciones acuícolas, pero aún incipientes o con falencias.** El Brasil y el Ecuador mencionan en sus respectivas legislaciones la zonificación o establecimiento de áreas para la acuicultura. Sin embargo, su aplicación es deficiente debido a complejidades legales en la definición y reglamentación del uso de los espacios hídricos (Kokke, Gomes y Manrique, 2023), o porque los fundamentos para la zonificación son recientes (Secretaría Técnica Planifica Ecuador, 2020).

Un punto fuerte que posee la legislación del Ecuador es la preferencia del cultivo de algas en un sistema de “policultivo”. Este término se refiere al cultivo simultáneo de dos o más especies de igual nivel trófico (González-Henríquez *et al.*, 2015). Aunque no debe confundirse con la definición de la AMTI, el caso ecuatoriano es el único en América Latina que aproxima su legislación de macroalgas a los cultivos multitróficos. Además, la legislación acuícola ecuatoriana sobresale por incorporar la seguridad operacional alineándose con las normativas nacionales e internacionales vigentes (*Acuerdo N.º 23, 2015, Cap. VIII*).

Los puntos críticos identificados en las legislaciones de ambos países corresponden a:

- **Nula promoción de bancos de semillas.** Las legislaciones específicas para macroalgas y las acuícolas en general no mencionan la promoción de bancos de semillas o germoplasma. Este es un tema crítico para el cultivo de especies como *Gracilaria* en Brasil (Reis, Castelar y Santos, 2017). Mientras que en el

Ecuador el gobierno lo ha establecido como prioridad para el 2030 a través de la consolidación del Banco Nacional de Germoplasma (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2016).

- **Promoción incipiente de la investigación.** El establecimiento de centros de investigación para la acuicultura es otro aspecto que se aborda superficialmente en las legislaciones revisadas. En el Brasil, si bien la *Instrucción Normativa Interministerial N.º 6* (2004) establece Unidades de Investigación para desarrollar tecnología acuícola, se considera que el gobierno debe dar más impulso a la investigación de macroalgas para generar tecnologías que permitan cultivar especies nativas, especialmente en zonas sensibles a la introducción de especies foráneas (Reis, Castelar y Santos, 2017). En el caso del Ecuador, la legislación no promueve explícitamente la creación de centros de investigación de excelencia, pero sí considera el trabajo conjunto con estos actores en actividades de investigación.

Países con marcos regulatorios generales de nivel intermedio

Esta categoría incluye países que tienen un nivel de desarrollo del cultivo de macroalgas incipiente (México, el Perú y Panamá) o nulo (Costa Rica, Honduras y el Uruguay). Si bien estos países no cuentan con un marco regulatorio específico, cuentan con legislaciones acuícolas nacionales que en menor o mayor medida podrían servir como marco para la promoción del cultivo de macroalgas. Entre estos seis países, destacan las legislaciones de México y el Perú, las cuales contemplan o han contemplado el ordenamiento de la extracción de macroalgas a nivel regional, aunque su efectividad es cuestionable.

A continuación, se detallan los puntos fuertes de los marcos regulatorios para la promoción de la acuicultura de macroalgas:

- **Énfasis en investigación acuícola.** La mayoría de las legislaciones acuícolas nacionales en este grupo contemplan explícitamente la investigación. Por ejemplo, en el Perú, el desarrollo tecnológico e innovación son principios que rigen la legislación, mientras que, en México, la legislación acuícola dedica todo un capítulo a la Investigación y Capacitación. Ambos países cuentan con redes o centros dedicados a la investigación acuícola, y sus legislaciones promueven la colaboración con otras entidades académicas y productivas. Por su parte, Costa Rica y Panamá, aunque mencionan la promoción de la investigación en sus legislaciones, abordan superficialmente la puesta en marcha de centros de investigación.
- **El criterio precautorio como uno de los principios de la legislación.** El criterio precautorio constituye un principio fundamental en la mayoría de los marcos regulatorios de este grupo, con excepción de Costa Rica. Un ejemplo de la aplicación concreta de este criterio se da en México, donde la *Norma Oficial Mexicana N.º 010-PESC-1993 (NOM-010-PESC-1993)* establece los requisitos sanitarios para la importación de organismos acuáticos vivos. Esta normativa da una base sólida para regular la introducción de especies foráneas de macroalgas, lo cual se puede reforzar con medidas de bioseguridad, un aspecto que varía entre países, pero que generalmente se centra en animales acuáticos.

Un aspecto para resaltar es que Honduras y Costa Rica son los únicos en este grupo que abordan temas de seguridad para los acuicultores en sus legislaciones; incluso este último prohíbe explícitamente el trabajo infantil en navíos, aunque solo enfocado a la pesca.

Los puntos críticos identificados en los marcos regulatorios acuícolas corresponden a:

- **Ausencia de la AMTI.** Este punto crítico es compartido en la mayoría de las legislaciones en América Latina. No obstante, ya se está tomando en consideración la AMTI en zonas concretas, como la bahía de Samanco en el Perú (Loayza-Aguilar *et al.*, 2023), o detallando las especies que se podrían utilizar, como el

quelpo *Eisenia arborea*, en conjunto con el abalón rojo (*Haliotis rufescens*), en México (Vázquez-Delfín et al., 2019).

- **Poca consideración a la gestión del espacio marino.** Al igual que el punto anterior, este criterio es una de las mayores deficiencias en América Latina. Si bien algunas legislaciones, como las de Panamá y Honduras, mencionan superficialmente las zonificaciones y existen herramientas de apoyo para el ordenamiento de la actividad acuícola (p. ej., el Catastro Acuícola Nacional del Perú), la gestión espacial marina está ausente en la mayoría de los casos.
- **Nula promoción para la inversión acuícola a largo plazo.** La falta de promoción para inversiones a largo plazo constituye otro punto crítico en América Latina. Como se mencionó anteriormente, en países con una industria algal emergente son necesarios los incentivos fiscales y económicos para su promoción, lo cual deja en un segundo plano las estrategias para la inversión a largo plazo. Un claro ejemplo es la legislación de México, que establece la aplicación de estímulos fiscales, económicos y de apoyo financiero para el desarrollo productivo y competitivo de la acuicultura. En este contexto, se articula el Fondo Mexicano para el Desarrollo Pesquero y Acuícola, cuyo fin es facilitar el acceso a los servicios financieros por parte de los actores involucrados. Sin embargo, no se especifica cómo estos estímulos podrían asegurar una inversión a largo plazo en la acuicultura.

Países solo con marcos regulatorios generales de nivel inicial

Esta categoría incluye países sin experiencia (la Argentina, la República Dominicana, Nicaragua y El Salvador,) o con experiencia limitada (Colombia y Cuba) en el cultivo de macroalgas, cuyos marcos regulatorios poseen muchas más deficiencias que el grupo anterior. Por lo tanto, es necesario primero mejorar dichos marcos antes de establecer legislaciones específicas según las necesidades de cada país. Aunque es difícil identificar aspectos positivos generales en las legislaciones actuales, cabe destacar que:

- La Argentina contempla a las macroalgas en las leyes relacionadas a su explotación en playas y áreas marítimas (*LEY N.º 3.273* y *LEY XVII-N.º 6*), así como en la *Estrategia Nacional sobre Especies Exóticas Invasoras (Resolución N.º 211, 2022)*, donde se aborda el caso del alga parda invasiva *Undaria pinnatifida*. Los países de América Central y el Caribe contemplan explícitamente el principio precautorio, mientras que los de América del Sur ponen énfasis en la investigación acuícolas.
- El Salvador, Nicaragua y la República Dominicana son los únicos países en el grupo que contemplan parcial o enteramente algún aspecto social, por ejemplo, la seguridad laboral de los acuicultores.
- Cuba y Guatemala son los únicos países que contemplan ampliamente aspectos de bioseguridad, aunque no enfocados al cultivo de organismos marinos.

Los principales criterios ausentes o abordados de manera superficial en los marcos regulatorios son: i) el enfoque ecosistémico; ii) promoción de bancos de semillas o germoplasma; iii) la AMTI, y iv) la gestión del espacio marino. Sin embargo, diversos países están desarrollando planes y estrategias nacionales para incorporar estos criterios en sus legislaciones. Un ejemplo es Colombia, donde la producción de semilla constituye un eje central en el Plan Nacional de Desarrollo Sostenible de la Acuicultura, especialmente en temas ligados a repoblamiento, conservación y mejoramiento genético de las especies cultivadas (Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca de Colombia, 2014).

CONCLUSIONES

El análisis del marco regulatorio para el cultivo de macroalgas en América Latina muestra un panorama diverso, donde coexisten avances significativos y deficiencias importantes. De los 17 países evaluados, solo cuatro han desarrollado legislaciones

específicas para el cultivo de macroalgas, mientras que los demás tienen una regulación incipiente o carecen por completo de ella. El Brasil, Chile, el Ecuador y la República Bolivariana de Venezuela destacan como líderes en este aspecto, con normativas que regulan aspectos específicos del cultivo de macroalgas, aunque todavía tienen margen de mejora.

El análisis de las legislaciones ha identificado puntos críticos comunes que deben abordarse para lograr un desarrollo sostenible de la industria de macroalgas en la región. Estos incluyen: i) la falta de un enfoque ecosistémico; ii) la ausencia de políticas para la promoción de bancos de germoplasma; iii) la necesidad de fomentar la inversión a largo plazo; iv) la falta de aplicación de la AMTI; v) la deficiente gestión del espacio marino, y vi) la falta de atención a aspectos sociales.

Las legislaciones reflejan las realidades y prioridades de cada país, y evolucionan junto con la industria de macroalgas y los avances científicos. Se han identificado cuatro grupos importantes de legislaciones, cada uno con sus propias ventajas y desafíos, lo que subraya la necesidad de abordar de manera específica las particularidades de cada contexto para promover un desarrollo equitativo y sostenible del cultivo de macroalgas en América Latina.

RECOMENDACIONES

- Incorporar el enfoque ecosistémico en las legislaciones con el fin de promover una acuicultura que sea sostenible, equitativa y resiliente.
- Fomentar la inversión a largo plazo a través de políticas e incentivos fiscales y económicos que aseguren la inversión y el desarrollo continuo a largo plazo. Esto podría incluir el establecimiento de políticas que salvaguarden la industria en caso de desastres naturales o brote de enfermedades.
- Atender aspectos sociales en el marco regulatorio, como la equidad de género, los derechos laborales y la participación de comunidades indígenas, con el objetivo de garantizar una sostenibilidad social de la actividad acuícola.
- Desarrollar e implementar estrategias efectivas de gestión del espacio marino que ordenen la actividad acuícola y prevengan conflictos relacionados con el uso de áreas marinas.
- Promover la investigación en el cultivo de macroalgas y el desarrollo de tecnologías innovadoras que impulsen la industria. Esto podría lograrse mediante la creación de centros de investigación especializados y la colaboración con instituciones académicas, empresas privadas, pescadores, acuicultores y población local.
- Establecer medidas concretas para preservar la diversidad genética de las especies de macroalgas, incluyendo la promoción de bancos de semillas o germoplasma algal. Esto garantizará la conservación de recursos genéticos importantes para el desarrollo futuro de la industria.
- Fortalecer las medidas de bioseguridad en el cultivo de macroalgas para prevenir la introducción de enfermedades y plagas, así como para proteger los ecosistemas marinos. Esto podría incluir la implementación de protocolos de cuarentena, elaboración de diagnósticos rápidos de enfermedades y certificación para nuevas introducciones de especies.
- Crear espacios de colaboración y el intercambio de mejores prácticas entre los países de la región. Esto permitirá aprender de las experiencias de otros y avanzar hacia una regulación más integral y efectiva en toda América Latina.

REFERENCIAS

Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca de Colombia. 2014. Plan Nacional para el Desarrollo de la Acuicultura Sostenible en Colombia – PlaNDAS. Bogotá (Colombia). <https://fedecua.org/files/plan-nacional-para-el-desarrollo-de-la-acuicultura-sostenible-colombia.pdf>.

- Banco Mundial.** 2023. *Global Seaweed: New and Emerging Markets Report*. Washington D.C. (EE.UU.) <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/4ac8c40c-cc4d-4f38-90a9-01b7bbaad3eb>
- Camelo-Guarín, S., Molinet, C. y Soto, D.** 2021. Recommendations for implementing integrated multitrophic aquaculture in commercial farms at the landscape scale in southern Chile. *Aquaculture*, 544: 737116. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737116>
- Cottier-Cook, E. J., Nagabhatla, N., Badis, Y., Campbell, M., Chopin, T., Dai, W., Fang, J., et al.** 2016. *Safeguarding the future of the global seaweed aquaculture industry*. Policy Brief de la Universidad de las Naciones Unidas (INWEH) y la Asociación Escocesa de Ciencias del Mar. <https://www.sams.ac.uk/t4-media/sams/pdf/globalseaweed-policy-brief.pdf>
- Delgado, J.R., Fernández, J.C. y Yerena, E.** 2021. Integrated Management of Coastal Zones in Venezuela. *Revista Costas*, 2: 455-472. <https://www.jstor.org/stable/26482389>
- Dillehay, T.D., Ramírez, C., Pino, M., Collins, M.B., Rossen, J. y Pino-Navarro, J.D.** 2008. Monte Verde: seaweed, food, medicine, and the peopling of South America. *Science*, 320(5877): 784-786. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1156533>
- FAO.** 2010. *Aquaculture Development - Ecosystem Approach to Aquaculture*. FAO Directrices Técnicas para la Pesca Responsable de la FAO, n.º 5, suplemento 4. Roma, FAO. <https://openknowledge.fao.org/items/0b637d5f-3275-4254-a7da-8e63f02ee737>
- FAO.** 2020. FAOLEX Database. En: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Rome. [Consultado el 12 de febrero de 2025]. <https://www.fao.org/faolex/en/>
- FAO.** 2023a. *Reconocimiento y mejora de la contribución de las algas al desarrollo de la acuicultura mundial*. Comité de Pesca. Doceava reunión del Subcomité de Acuicultura, Hermosillo (México), 16-19 de mayo de 2023. www.fao.org/3/cc5728es/cc5728es.pdf
- FAO.** 2023b. *Legal frameworks for sustainable aquaculture*. Estudio Legislativo de la FAO. n.º 117. Roma, FAO. <https://openknowledge.fao.org/items/267bfd9-4bf6-45e6-bacd-5d035d9b9197>
- FAO.** 2024. Visión general de la legislación acuícola nacional (NALO). En: *División de Pesca y Acuicultura de la FAO*. Roma. [Consultado el 12 de febrero de 2025]. www.fao.org/fishery/es/collection/legalframework
- Frank, K.** 2020. K. Seaweed Aquaculture. An assessment of the legal and management structure on seaweed farming in Iceland. Ísafjörður (Islandia), Centro Universitario de Westfjords. Tesis. <https://samradapi.island.is/api/Documents/ea3c8e08-e7f8-ea11-9b99-005056bccc7e>
- Gobierno de Chile.** 2016. Crea Bonificación para el Repoblamiento y Cultivo de Algas (Ley N.º 20.925). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1091690>
- Gobierno de Chile.** 2018. Política Oceánica Nacional de Chile. Santiago de Chile (Chile). <https://faolex.fao.org/docs/pdf/chi176987anx.pdf>
- González-Henríquez, N., Rey-Méndez, M., Pérez, Y., Bilbao, A., Pavón N., Louzara, G. y Domínguez, R.** 2015. Cultivos multitrofos: complementos a la explotación de otras especies de fuerte presencia en el mercado. VII Foro Iberoamericano de los Recursos Marinos y Acuicultura (FIRMA), Machala (Ecuador), 18-21 de noviembre de 2014. https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/73435/2/Cultivos_multitrofos_complementos.pdf
- Hayashi, L., Reis, R.P., dos Santos, A.A., Castelar, B., Robledo, D., de Vega, G.B., Msuya, F.E., Eswaran, K., Yasir, S.M., Ali, M.K.M. y Hurtado, A.Q.** 2017. The Cultivation of *Kappaphycus* and *Eucheuma* in Tropical and Sub-Tropical Waters. En: Hurtado, A., Critchley, A., Neish, I. (coords.) *Tropical Seaweed Farming Trends, Problems and Opportunities. Developments in Applied Phycology*, 9: 55-90. Cham (Suiza), Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63498-2_4

- Hodgson, S. 2023. *Aquaculture Legal Assessment and Revision Tool*. Guía Legal de la FAO, n.º 6. Roma, FAO. <https://openknowledge.fao.org/items/fb664a6e-d024-46c6-a900-abfd19a57c6b>
- Kokke, M., Gomes, M.F. y Manrique, J.I.T. 2023. Marco legal de la acuicultura en Brasil: cesión de espacios hídricos e impactos ambientales. *Veredas do Direito*, 20: e202417. <https://doi.org/10.18623/rvd.v20.2417>
- Loayza-Aguilar, R.E., Huamancondor-Paz, Y.P., Saldaña-Rojas, G.B. y Olivares-Ramírez, G.E. 2023. Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA): Strategic model for sustainable mariculture in Samanco Bay, Peru. *Frontiers in Marine Science*, 10: 1151810. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1151810>
- Méndez, C., Bustamante, D.E., Calderón, M.S., Gauna, C., Hayashi, L., Robledo, D., Tapia-Larios, C., Campbell, I., Westermeier, R. y Murúa, P. 2024. Biosecurity baseline for a sustainable development of seaweed aquaculture in Latin America. *Marine Policy*, 159: 105933. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105933>
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca del Ecuador. 2013. Instructivo de la Normativa General para Promover y Regular la Producción Orgánica – Ecológica – Biológica en el Ecuador. Quito (Ecuador). www.gob.ec/sites/default/files/regulations/201810/Documento_Instructivo%20de%20la%20Normativa%20General%20para%20Promover%20y%20Regular%20la%20Producci%C2%A6n%20Org%2B%C3%ADnica%20-%20Ecol%2B%C2%A6gica%20-%20Biol%2B%C2%A6gica%20en%20el%20Ecuador.pdf
- Ministerio del Medio Ambiente de Chile. 2015. Estrategia nacional de biodiversidad 2017–2030. Santiago de Chile (Chile). https://estrategia-aves.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2023/03/MMA_2017_Estrategia_Nacional_Biodiversidad_2017-2030.pdf
- Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile. 2023. Programa Oceánico Nacional. Santiago de Chile (Chile). https://www.minrel.gob.cl/minrel/site/docs/20230714/20230714170715/programa_oceanico_2023.pdf
- Montúfar-Romero, M., Rincones-León, R.E., Cáceres-Farías, L.B., Espinoza-Vera, M.M., Avendaño, U., Cruz-Jaime, T., Cubillos, L., Ruiz, W., Revelo, W., Lodeiros, C., Alfaro-Núñez, A. y Cáceres-Farías, L. 2023. Feasibility of aquaculture cultivation of elkhorn sea moss (*Kappaphycus alvarezii*) in a horizontal long line in the Tropical Eastern Pacific. *Scientific Reports*, 13(1): 14751. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41795-x>
- Pérez-Lloréns, J.L. 2019. Seaweed consumption in the Americas. *Gastronomica*, 19(4): 49–59. <https://doi.org/10.1525/gfc.2019.19.4.49>
- Reis, R.P., Castelar, B. y Santos, A.A.D. 2017. Why is algaculture still incipient in Brazil? *Journal of Applied Phycology*, 29: 673–682. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0890-8>
- Secretaría Técnica Planifica Ecuador. 2020. Plan de ordenamiento del espacio marino costero 2017–2030. Versión resumida. Quito (Ecuador). www.conservation.org/docs/default-source/ecuador-documents/plan-de-ordenamiento-del-espacio-marino-costero.pdf?sfvrsn=a2e8594e_12
- Simioni, C., Hayashi, L. y Oliveira, M.C. 2019. Seaweed resources of Brazil: what has changed in 20 years? *Botanica Marina*, 62(5): 433–441. <https://doi.org/10.1515/bot-2019-0021>
- Vázquez-Delfín, E., Freile-Pelegrín, Y., Pliego-Cortés, H. y Robledo, D. 2019. Seaweed resources of Mexico: current knowledge and future perspectives. *Botanica Marina*, 62(3): 275–289. <https://doi.org/10.1515/bot-2018-0070>
- Vergara, J. y Vásquez, C. 2021. *Manual de procedimientos para la instalación y operación de un cultivo de pelillo*. Proyecto Fortalecimiento de la capacidad de adaptación en el sector pesquero y acuícola chileno al cambio climático (GCP/CHI/039/GFF). Santiago de Chile, FAO. <https://es.scribd.com/document/660023891/Articles-111596-Recurso-14>
- Wurmann, C., Soto, D. y Norambuena, R. 2022. Regional review on status and trends in aquaculture development in Latin America and the Caribbean – 2020. Circular de Pesquería y Acuicultura de la FAO, n.º 1232/3. Roma, FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/c856a848-0dd8-499a-9e87-378d6d948a6d/content>

Apéndice 1

LISTA DE LEGISLACIONES EVALUADAS

País	Nombre de la legislación	¿Específica para el cultivo de macroalgas?
Argentina	Desarrollo Sustentable del Sector Acuícola (Ley 27.231)	No
Argentina	Ley de ordenamiento de la explotación de algas marinas (Ley 32.773)	No, pero comprende la explotación de algas marinas
Argentina	Ley XVII-6	No, pero comprende la explotación de algas marinas
Argentina	Programa Nacional De Desarrollo Acuícola Sustentable – Creación (Resolución 253/2021)	No
Argentina	Régimen de seguimiento, control y vigilancia de los recursos marítimos (Ley XVII-70)	No
Argentina	Registro Nacional de Establecimientos de Acuicultura – RENACUA (Resolución 197-16)	No
Argentina	Normas que regularán la producción de Organismos Acuáticos Vivos en los emprendimientos/establecimientos que se dediquen a la actividad de acuicultura (Resolución 1314/04)	No
Argentina	Espacios marítimos (Ley 27.167)	No
Argentina	Estrategia nacional sobre especies exóticas invasoras (Resolución 211/2022)	No, pero incluye a <i>Undaria pinnatifida</i> (Phaeophyceae) en la lista de especies invasoras
Brasil	Instrucción Normativa N.º 3	No, pero menciona a las algas marinas en su definición de acuicultura
Brasil	Permite el cultivo de <i>Kappaphycus alvarezii</i> en la costa de Santa Catarina, Río de Janeiro y Sao Paulo (Instrucción Normativa N.º 1 IBAMA 2020)	Sí, pero restringida a <i>K. alvarezii</i>
Brasil	Establece la Política de Estado para el Desarrollo Sostenible de la Acuicultura en el Estado de Rio Grande del Sur (Ley 15.647)	No
Brasil	Instrucción Normativa Interministerial N.º 6	No
Brasil	Acceso y participación en los beneficios derivados de los recursos genéticos y conocimientos tradicionales conexos (Ley 13.123)	No
Brasil	Prevé la clasificación de los cuerpos de agua y lineamientos ambientales para su clasificación, así como establece las condiciones y estándares para la liberación de efluentes, y establece otras medidas (Resolución CONAMA N.º 357)	No
Brasil	Prevé la transferencia de uso de espacios físicos en masas de agua bajo control de la Unión para la práctica de la acuicultura (Decreto N.º 10.576)	No
Brasil	Establece la Política de Estado (Marañón) para Desarrollo de la Pesca y la Acuicultura, y establece otras medidas (Ley 8.089)	No
Brasil	Establece normas y criterios para el licenciamiento ambiental de Empresas y actividades de acuicultura y maricultura – Estado del Paraná (Resolución N.º 059/2019)	No
Brasil	Prevé la licencia ambiental para la acuicultura en el Estado de Espírito Santo y prevé otras medidas (Decreto N.º 3831-R)	No
Brasil	Instituye el código de pesca y acuicultura del Estado (Rio de Janeiro) (Ley 11.165)	No
Brasil	Regula la actividad acuícola en el Estado de Goiás y dispone otras medidas (Decreto N.º 7.862)	No

País	Nombre de la legislación	¿Específica para el cultivo de macroalgas?
Brasil	Permitir la exploración, explotación, transporte y comercialización, incluida la reventa, de algas marinas de la costa brasileña (Instrucción Normativa N.º 89)	No, pero abarca la explotación de algas marinas
Chile	Ley General de Pesca y Acuicultura (Ley 18.892)	No, pero menciona a las algas marinas en su definición de acuicultura
Chile	Bonificación para el repoblamiento y cultivo de algas (Ley 20.925)	Sí
Chile	Reglamento de internación de especies de primera importación (Decreto N.º 730)	No
Chile	Reglamento de Concesiones de Acuicultura (Decreto N.º 290)	No
Chile	Reglamento ambiental para la acuicultura (Decreto N.º 320)	No
Chile	Reglamento de actividades de acuicultura en áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos (Decreto N.º 314-04)	No
Chile	Reglamento de medidas de protección, control y erradicación de enfermedades de alto riesgo para las especies hidrobiológicas (Decreto N.º 319)	No
Chile	Reglamento sobre plagas hidrobiológicas (Decreto N.º 345)	No
Chile	Listado de macroalgas marinas nativas para la bonificación al repoblamiento y cultivo de algas (Resolución exenta N.º 2539/2016)	Sí
Chile	Declaración de emergencia de plaga por presencia de especie exótica invasiva correspondiente a la microalga <i>Saccharina japonica</i> (Resolución exenta N.º 226/2021)	No, pero lidia con temas de bioseguridad
Chile	Programa de Vigilancia de algas epifitas filamentosas tipo <i>Rhizoclonium</i> spp. (Resolución exenta N.º 1085/2020)	Sí
Chile	Declaración de área de plaga de algas epifitas filamentosas tipo <i>Rhizoclonium</i> spp. (Resolución exenta N.º 2160/2022)	Sí
Colombia	Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo Agropecuario, Pesquero y de Desarrollo Rural (Decreto N.º 1071/2015)	No
Colombia	Ley General de Desarrollo Agropecuario y Pesquero (Ley 101)	No
Colombia	Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente (Decreto N.º 2811/1974)	No
Colombia	Estatuto General de Pesca (Ley 13)	No
Costa Rica	Ley de Pesca y Acuicultura (Ley 8436)	No, pero menciona a la flora acuática en su definición de acuicultura
Costa Rica	Reglamento a Ley de Conservación de la Vida Silvestre (Decreto N.º 26435-MINAE)	No
Costa Rica	Guía general para la valoración de los impactos ambientales generados por la actividad de Maricultura y formularios por categoría (Decreto N.º 42755-MINAE)	No, pero considera a las macroalgas dentro de la categoría de moluscos bivalvos para fines de límites de producción
Cuba	Ley de Pesca (Ley 129)	No
Cuba	Reglamento de Pesca (Decreto N.º 164)	No
Cuba	Decreto Ley de la Seguridad Biológica (Decreto N.º 190)	No
Cuba	Reglamentación higiénico-sanitaria para los acuatorios dedicados a la cría, mantenimiento y/o cultivo de organismos acuáticos en el territorio nacional (Resolución N.º 68/99)	No
Ecuador	Instructivo de la Normativa General para Promover y Regular la Producción Orgánica – Ecológica – Biológica en el Ecuador (Acuerdo Ministerial N.º 299/2013)	Sí

Lista de legislaciones evaluadas (continuación)

País	Nombre de la legislación	¿Específica para el cultivo de macroalgas?
Ecuador	Ley Orgánica para el Desarrollo de la Acuicultura y Pesca (Registro Oficial N.º 187/2020)	No, pero incluye a las algas dentro de su definición de acuicultura
Ecuador	Reglamento general a la ley orgánica para el desarrollo de la acuicultura y pesca (Decreto N.º 362)	No
Ecuador	Instructivo para el ordenamiento, control de concesiones y fomento de las actividades de maricultura en el Ecuador (Acuerdo N.º 023)	No
El Salvador	Ley general de ordenación y promoción de pesca y acuicultura (Decreto N.º 637)	No
El Salvador	Plan nacional de desarrollo sustentable de la pesca y la acuicultura de El Salvador 2015–2030	No, pero menciona a las algas como especies promisorias para el cultivo
Guatemala	Ley general de pesca y acuicultura (Decreto N.º 80-2002)	No
Guatemala	Ley de protección y mejoramiento del medio ambiente (Decreto N.º 68–86)	No
Guatemala	Ley de sanidad vegetal y animal (Decreto N.º 36–98)	No
Honduras	Ley general de pesca y acuicultura (Decreto N.º 106-2015)	No
Honduras	Estrategia nacional de biodiversidad y su plan de acción 2018–2022	No, pero menciona brevemente el registro de macroalgas en el país
México	Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentables	No, pero menciona a la flora acuática en su definición de acuicultura
México	Ley general del equilibrio ecológico y la protección al medio ambiente	No
México	Reglamento de la ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente en materia de evaluación del impacto ambiental	No
México	Guía para la presentación de la manifestación de impacto ambiental pesquero–acuícola	No
México	PROYECTO de Norma Oficial Mexicana NOM-010-PESC-1993, que establece los requisitos sanitarios para la importación de organismos acuáticos vivos en cualquiera de sus fases de desarrollo, destinados a la acuicultura u ornato, en el territorio nacional	No
México	NORMA Oficial Mexicana NOM-011-PESC-1993, para regular la aplicación de cuarentenas, a efecto de prevenir la introducción y dispersión de enfermedades certificables y notificables, en la importación de organismos acuáticos vivos en cualesquiera de sus fases de desarrollo, destinados a la acuicultura y ornato en los Estados Unidos Mexicanos	No
México	NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación	No
México	Plan de manejo para la pesquería de macroalgas en Baja California, México	No, pero regula la extracción regional de macroalgas
México	Programa especial derivado del plan nacional de desarrollo 2020–2024	No
México	Lineamientos Técnicos y de Gestión para la Atención de la Contingencia Ocasionada por Sargazo en el Caribe Mexicano y el Golfo de México	No, pero establece lineamientos para la contención y retiro del sargazo (<i>Sargassum</i> spp.)
Nicaragua	Ley de Pesca y Acuicultura (Ley 489)	No
Nicaragua	Ley general del Instituto Nicaragüense de la Pesca y Acuicultura (Ley 678)	No
Nicaragua	Ley de Reforma al artículo 111 de la Ley N.º 489, “Ley de Pesca y Acuicultura” y de Reforma al artículo 126 de la Ley N.º 453, “Ley de Equidad Fiscal” (Ley 797)	No

Lista de legislaciones evaluadas (contiunación)

País	Nombre de la legislación	¿Específica para el cultivo de macroalgas?
Panamá	Ley que regula la pesca y la acuicultura en la República de Panamá y dicta otras disposiciones (Ley 704)	No
Panamá	Resolución que reglamenta los artículos 94 y 95 de la Ley 41 de 1998 General de Ambiente: aprovechamiento, manejo y conservación de los recursos costeros y marinos en las áreas protegidas de Panamá (Resolución AG-0491-2006)	No
Perú	Ley General de Pesca (Decreto N.º 25977)	No
Perú	Reglamento de la Ley General de Pesca (Decreto Supremo N.º 012-2001-PE)	No
Perú	Ley General de Acuicultura (Decreto Legislativo N.º 1195)	No
Perú	Reglamento de la Ley General de Acuicultura (Decreto Supremo N.º 003-2016-PRODUCE)	No
Perú	Decreto Supremo que modifica el Reglamento de la Ley General de Acuicultura (Decreto Supremo N.º 012-2021-PRODUCE)	No
Perú	Ley sobre la conservación y aprovechamiento sostenible de la diversidad biológica (Ley 26839)	No
Perú	Ley General del Ambiente (Ley 28611)	No
Perú	Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para la Sanidad de los Recursos Hidrobiológicos en el ámbito de competencia del Organismo Nacional de Sanidad Pesquera (SANIPES) (Decreto Supremo N.º 027-2021-PRODUCE)	No
Perú	Ley de Promoción y Fortalecimiento de la Acuicultura (Ley 31666)	No
Perú	Decreto Supremo de Reglamento de Fiscalización y Sanción de las Actividades Pesqueras y Acuícolas (Decreto Supremo N.º 017-2017-PRODUCE)	No
Perú	Texto único ordenado del reglamento de inspecciones y sanciones pesqueras y acuícolas-RISPAC (Decreto Supremo N.º 019-2011-PRODUCE)	No
Perú	Plan de Acción actualizado de la Estrategia Nacional de Diversidad Biológica al 2021	No
Perú	Reglamento de la Ley sobre Conservación y Aprovechamiento Sostenible de la Diversidad Biológica (Decreto Supremo N.º 068-2001-PCM)	No
Perú	Plan de trabajo del sistema de vigilancia de enfermedades de especies hidrobiológicas	No
Perú	Reglamento de Ordenamiento Pesquero de Recursos Invertebrados Marinos Bentónicos (Decreto Supremo N.º 017-2017-PRODUCE)	No
Perú	Lineamientos sanitarios mínimos para la categoría productiva de acuicultura de recursos limitados – AREL (Resolución N.º 080-2020-SANIPES-PE)	No
Perú	Reglamento de Gestión Ambiental de los Subsectores Pesca y Acuicultura (Decreto Supremo N.º 012-2019-PRODUCE)	No
Perú	Reglamento de Ordenamiento Pesquero de Macroalgas Marinas (Decreto Supremo N.º 264-2009-PRODUCE)	No, pero regula la colecta de macroalgas marinas en el litoral
República Dominicana	Ley que crea el Consejo Dominicano de Pesca y Acuicultura (Ley 307-04)	No
Uruguay	Declárase de interés general la conservación, investigación y el desarrollo sostenible de los recursos hidrobiológicos (Ley 19.175)	No
Uruguay	Estrategia General para el Desarrollo de la Acuicultura Sostenible en la República Oriental del Uruguay	No
Uruguay	Política Nacional para el Desarrollo de la Acuicultura Sostenible en la República Oriental del Uruguay	No
Venezuela (República Bolivariana de)	Ley de Pesca y Acuicultura (Decreto N.º 1.408)	No, pero menciona a las algas marinas en su definición de acuicultura

Lista de legislaciones evaluadas (continuación)

País	Nombre de la legislación	¿Específica para el cultivo de macroalgas?
Venezuela (República Bolivariana de)	Normas para el impulso de la producción y atención a las necesidades fundamentales del sector Pesca y Acuicultura, mediante el empleo del aporte que realizan los pescadores, pescadoras, acuicultores y acuicultoras industriales como responsabilidad solidaria (Gaceta Oficial N.º 40.975)	No
Venezuela (República Bolivariana de)	Resolución que regula el aprovechamiento, cultivo y actividades conexas de las especies de algas y cianobacterias para su desarrollo sustentable y sostenibilidad, en la República Bolivariana de Venezuela (Gaceta Oficial N.º 42.787)	Sí

Desafíos y oportunidades para la consolidación de la acuicultura de macroalgas en América Latina: perspectivas ecológicas, ambientales y de bioseguridad

José A. Zertuche-González y José Miguel Sandoval-Gil

Universidad Autónoma de Baja California
Ensenada, Baja California, México

Zertuche-González, J.A. y Sandoval-Gil, J.M. 2025. *Desafíos y oportunidades para la consolidación de la acuicultura de macroalgas en América Latina: perspectivas ecológicas, ambientales y de bioseguridad*. En: Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Murúa Andrade, P. y Farías Molina, A. (coords.). Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 24-26 de junio de 2024, Puerto Varas, Chile. *FAO Actas de Pesca y Acuicultura*. N.º 74. Roma, FAO. pp. 67-78.

RESUMEN

Las costas de América Latina incluyen países con aguas templadas y tropicales, donde prácticamente todos cuentan con recursos algales de valor comercial. El cultivo de macroalgas ofrece oportunidades que van más allá de la obtención de biomasa para uso industrial, destacando su función como biofiltros y su aporte a la mitigación del cambio climático. Sin embargo, esta actividad también presenta riesgos cuya identificación y tratamiento representa importantes retos, como la introducción de especies exóticas y de plagas, así como la contaminación biológica. Este documento analiza dichas oportunidades y retos desde las perspectivas ecológica, ambiental y de bioseguridad, considerando los servicios ambientales y sociales que las macroalgas aportan a América Latina. Partiendo del estado actual del cultivo de macroalgas en la región, se señalan las acciones pertinentes en materia de bioseguridad y se evalúan los marcos legales disponibles para impulsar el desarrollo sostenible de esta industria. El desarrollo de cultivos comerciales necesita un marco legal regional que incluya protocolos de bioseguridad adecuados. Las iniciativas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) para un desarrollo responsable de la acuicultura pueden adaptarse para abordar los riesgos específicos del cultivo de macroalgas.

INTRODUCCIÓN

América Latina tiene 33 países, y a excepción del Paraguay y el Estado Plurinacional de Bolivia, todos cuentan con costas marinas. Esta enorme región incluye costas del Pacífico templado, Pacífico central, Golfo de California, Atlántico y Mar Caribe. Sus litorales albergan aguas costeras templadas y tropicales donde existen mantos de macroalgas comerciales y condiciones propicias para su cultivo comercial.

En la Argentina, Chile, México y el Perú existe una industria de más de medio siglo de aprovechamiento de macroalgas provenientes de mantos naturales. En estos países,

la cosecha de macroalgas se destina principalmente a la extracción de ficocoloides: agar, carragenina y alginatos. En la década de 1980, comenzó el cultivo de abulón en México y su introducción en Chile. Esto estimuló que *Macrocystis pyrifera*, que tradicionalmente se empleaba para la producción de alginatos, comenzara a utilizarse como alimento de forma directa o como componente de alimentos equilibrados. Posteriormente, la creciente popularidad de los extractos de macroalgas en la agricultura en otros países motivó el desarrollo de plantas de producción de bioestimulantes agrícolas en América Latina. Actualmente, la producción de bioestimulantes a partir de macroalgas se lleva a cabo en el Brasil, Chile, México y el Perú. Sin embargo, todas estas industrias están limitadas por la disponibilidad de mantos naturales. En algunos casos, las poblaciones naturales han sido afectadas por sobrepesca, como el caso de Chile con *Gracilaria* (Bushmann *et al.*, 2017). En otros, las reducciones de los mantos se deben a factores asociados al cambio climático, como en el caso de *M. pyrifera* en Baja California, México (Arafteh-Dalmau *et al.*, 2019).

El creciente interés en América y Europa por las macroalgas como un alimento de alto valor nutricional para consumo humano ha impulsado el desarrollo de su cultivo comercial. Desde principios de los años 80 se han realizado múltiples proyectos de investigación en América Latina con diversas especies tanto de aguas templadas como tropicales, para desarrollar estos cultivos (Rebours *et al.*, 2014; Alemañ, Robledo y Hayashi, 2019). El cultivo de macroalgas ofrece oportunidades que van más allá de la obtención de biomasa para uso industrial, como su aplicación en la acuicultura multitrófica integrada (AMTI) o en la mitigación del cambio climático. Sin embargo, también conlleva riesgos que requieren identificación y tratamiento. Entre los impactos documentados en relación con la acuicultura de macroalgas se encuentran la introducción de especies exóticas, plagas y enfermedades, así como la polución biológica. Este documento analiza estas oportunidades y retos desde una perspectiva ecológica, ambiental y de bioseguridad, considerando los servicios ambientales y sociales que las macroalgas proporcionan y que son relevantes para América Latina.

PERSPECTIVA ECOLÓGICA

Las comunidades de macroalgas sustentan numerosos servicios socioecológicos esenciales, particularmente en las zonas costeras. Estos bosques marinos son considerados como “ingenieros ambientales” en diversos ambientes intermareales y submareales (Matias *et al.*, 2015). Las macroalgas, como productores primarios, poseen una elevada capacidad de producción de oxígeno, fijación de carbono inorgánico disuelto y remoción de nutrientes. Por esta razón, se reconoce su importante papel en la mitigación de la acidificación oceánica y la eutrofización costera (Duarte *et al.*, 2017, Troell *et al.*, 2023). Dependiendo del tipo de cultivo, las macroalgas cultivadas pueden funcionar como bosques marinos, proporcionando servicios y beneficios similares a escala local. Desde la perspectiva ecológica, el impacto de estos cultivos se centra en las interacciones biológicas con su entorno y en cómo estos sistemas mantienen su equilibrio y función. Estas interacciones ecológicas de los cultivos de macroalgas con el entorno marino son complejas y afectan la estructura y funcionamiento de los ecosistemas costeros de diversas maneras. Los efectos pueden ser tanto positivos como negativos, dependiendo del contexto y del manejo de los cultivos, e incluyen aspectos como la introducción de especies invasoras, la creación de hábitats estructurales para la fauna asociada y las interacciones tróficas con herbívoros. Mientras que los cultivos de macroalgas pueden actuar como facilitadores de biodiversidad cuando se implementan de manera sostenible, también pueden provocar efectos adversos, como el desplazamiento de especies nativas y la alteración de las redes tróficas.

Interacciones ecológicas e impactos positivos en el medio ambiente

Los cultivos de macroalgas funcionan como filtros biológicos (o biofiltros) que eliminan nutrientes del agua. Por tanto, estos cultivos representan una “solución basada en la naturaleza” para mitigar la eutrofización. Este principio está vinculado a los beneficios de la acuicultura multitroficamente integrada (Pereira, Yarish, Critchley, 2024).

El secuestro de carbono representa otro impacto ambiental positivo de los cultivos de macroalgas en el contexto de la acidificación oceánica (Troell *et al.*, 2023). Gracias a sus tasas de crecimiento rápidas y su capacidad de fijar grandes cantidades de CO₂ a través de la fotosíntesis, las macroalgas son una herramienta eficaz para la captura de carbono (Ross *et al.*, 2023). A nivel global, iniciativas como el proyecto coreano “*Coastal CO₂ Removal Belt*” (Chung *et al.*, 2013), muestran este potencial. Sin embargo, aún no podemos considerar a los cultivos de macroalgas como sistemas secuestradores de “carbono azul”. Cada modelo de cultivo tiene implicaciones distintas, y aún se desconocen importantes factores condicionantes, como los procesos que determinan el destino del carbono particulado y exudado proveniente de estos cultivos o el uso de las macroalgas una vez cosechadas (Paine *et al.*, 2021; Troell *et al.*, 2023).

Las macroalgas cultivadas actúan como ingenieros ecosistémicos, generando efectos positivos al proporcionar sustrato para una amplia variedad de organismos epífitos, incluyendo otras algas, invertebrados y microorganismos. Además, funcionan como corredores ecológicos para especies móviles, lo que aumenta la conectividad de los ecosistemas marinos y crea zonas de amortiguamiento que fortalecen la resiliencia ecológica frente a perturbaciones. Entre los casos más estudiados en América Latina figuran los cultivos de *G. chilensis* y *M. pyrifera* en Chile (Alemañ, Robledo y Hayashi, 2019).

Interacciones ecológicas e impactos negativos en el medio ambiente

Los cultivos de macroalgas también pueden tener impactos ambientales negativos. Uno de los problemas más significativos ocurre cuando las especies cultivadas son exóticas o se establecen fuera de sus áreas de distribución natural, lo que puede provocar el desplazamiento de especies nativas y la pérdida de biodiversidad local. Un caso emblemático en América Latina es el impacto asociado a la introducción de *Undaria pinnatifida*. Esta especie exótica, originaria de Asia, se ha cultivado en diversas regiones y se ha convertido en invasora en las costas de la Argentina y el Uruguay, donde compite con especies nativas y altera la estructura de las comunidades (Bunicotro, Marcomini y Casas, 2019).

Aunque las granjas de macroalgas pueden incrementar la biodiversidad local, también pueden actuar como reservorio de enfermedades y plagas, particularmente de organismos epífitos. En los cultivos de *Gracilaria* en Chile, se ha observado la acumulación de epífitos como el alga verde *Rhizoclonium* (Alemañ, Robledo y Hayashi, 2019). De manera similar, los cultivos de *Gracilaria* sp. en Patagonia (la Argentina) y de *Gracilariopsis lemaneiformis* en el Perú han sufrido el problema de epifitismo severo (Hayashi *et al.*, 2014).

Las interacciones tróficas también juegan un papel importante en los cultivos de macroalgas, ya que son consumidas por diversos herbívoros, desde pequeños invertebrados hasta peces. En Chile, la interacción con herbívoros como los erizos (*Loxechinus albus*) también representa un desafío para los cultivos de *M. pyrifera* (Camus, Infante y Buschmann, 2018).

Además de los problemas señalados, existen otros riesgos ambientales menos documentados asociados a los cultivos de macroalgas. Entre ellos se encuentran el deterioro ambiental causado por la disminución de las corrientes marinas, lo que provoca la acumulación de sedimentos y cambios en la química del agua y el sustrato. También se observa la destrucción de hábitats por los sistemas de anclaje y efectos negativos en la flora y fauna bentónica debido al sombreado. Un ejemplo específico es

el de los cultivos de *Kappaphycus alvarezii*, donde las redes instaladas para prevenir el herbivorismo pueden atrapar tortugas marinas.

PERSPECTIVA AMBIENTAL

El desarrollo del cultivo de macroalgas requiere una evaluación integral de sus beneficios, retos y oportunidades para resolver problemas ambientales y de la salud humana. La AMTI y la acuicultura restaurativa emergen como enfoques prometedores en la producción sostenible de macroalgas, buscando optimizar la eficiencia y minimizar el impacto ambiental de los cultivos acuícolas (Pereira, Yarish, Critchley, 2024). La mitigación de los efectos del cambio climático destaca como uno de sus beneficios más importantes (Ross *et al.*, 2023). Una práctica innovadora, pero todavía en desarrollo, es la creación de arrecifes artificiales vinculados a cultivos de macroalgas, que busca aumentar la biodiversidad y restaurar hábitats marinos degradados (Jung *et al.*, 2022). Desde la perspectiva biotecnológica, las interacciones de las macroalgas en cultivo con su microbioma son fundamentales para la salud y productividad del sistema. Por tanto, el estudio del holobionte es fundamental para entender el desarrollo de los cultivos, así como en la implementación de estrategias para estimular su productividad (Li *et al.*, 2023).

Acuicultura multitrófica integrada y restaurativa

En la AMTI se cultivan simultáneamente especies de diferentes niveles tróficos, como peces, moluscos y macroalgas, de manera que cada uno de estos organismos contribuya a cerrar los ciclos de nutrientes dentro del sistema (Pereira, Yarish, Critchley, 2024). El principio se basa en la capacidad de las macroalgas para remover el exceso de nutrientes proveniente de la excreción de los organismos marinos en cultivo, nutrientes que a su vez favorecen el crecimiento de las propias macroalgas. Por su parte, la acuicultura restaurativa se centra en utilizar cultivos de macroalgas para rehabilitar ecosistemas degradados, mejorar la calidad del agua y secuestrar dióxido de carbono (CO₂), lo que la convierte en una herramienta valiosa para enfrentar desafíos ambientales globales (Wang *et al.*, 2025). La AMTI y la acuicultura restaurativa no solo ofrecen beneficios ambientales, sino que también tienen el potencial de aumentar la resiliencia económica y la seguridad alimentaria de las comunidades costeras en América Latina. Mediante la diversificación de los cultivos y la integración de especies, estos enfoques proporcionan alternativas para los productores locales que pueden reducir la dependencia de una sola especie y, al mismo tiempo, contribuir a la conservación de los ecosistemas marinos.

En América Latina, la AMTI ha crecido de manera significativa en las últimas décadas. La AMTI puede desarrollarse tanto en la costa como en el mar. En zonas templadas donde el cultivo de sargazos es viable (la Argentina, Chile, México y el Perú) se ha propuesto el cultivo de macroalgas asociado a peces y organismos filtro-alimentadores. En Chile, el sistema AMTI se ha implementado en las prácticas de cultivo de salmón en el sur del país. La combinación de salmones y mejillones con *G. chilensis* en la región de Los Lagos ha demostrado resultados prometedores en términos de mitigación de la contaminación por nutrientes (Troell *et al.*, 1997; Buschmann, Hernández-González y Varela, 2008). El Brasil y México también cuentan con ejemplos de AMTI, como la integración de cultivos de algas pardas para el crecimiento de abulón (Zertuche-González *et al.*, 2022) y el cultivo de algas del género *Ulva* con ostiones y camarón (Pellizzari y Reis, 2011). Por su parte, la acuicultura restaurativa se está desarrollando en México con especies de Laminariales como *E. arborea* y *M. pyrifera* en la Península de Baja California (Zertuche *et al.*, 2022). Estos proyectos buscan utilizar las granjas de cultivo de estas especies como centros de crecimiento de nuevas poblaciones en ecosistemas costeros degradados.

CAMBIO CLIMÁTICO Y SU RELACIÓN CON LA MARICULTURA DE MACROALGAS

En su reciente revisión, Ross *et al.* (2023) identificaron cuatro formas en las que las comunidades de macroalgas y sus cultivos pueden contribuir en la mitigación del cambio climático: 1) protección y restauración de bosques de algas naturales, 2) expansión de la acuicultura marina sostenible, 3) utilización de productos derivados de las algas para reducir las emisiones de carbono industriales, y 4) hundimiento de biomasa de algas en el océano profundo para el secuestro de carbono.

Diversos estudios analizan cómo los ecosistemas dominados por macroalgas pueden ejercer como sistemas secuestradores de carbono (azul) (Duarte *et al.*, 2017). Además de la capacidad de fijación de carbono inorgánico disuelto (CID) y su retención temporal como constituyente de sus tejidos, el transporte de materia orgánica disuelta y particulada proveniente de las macroalgas, y su transporte a zonas profundas, supone la principal vía de este secuestro de carbono azul en relación con estos sistemas. Para determinar los efectos netos de los cultivos de macroalgas en la mitigación del cambio climático, es fundamental identificar y cuantificar estos flujos de carbono (Ross *et al.*, 2023). La forestación oceánica (por ejemplo, el transporte facilitado de macroalgas a las partes profundas del océano) genera enormes controversias debido a los posibles impactos en el lecho profundo y porque desaprovecha biomasa que podría destinarse a otros beneficios, como aliviar el hambre, o su uso como alimento para el ganado.

Por su capacidad de fijación de CID y la liberación de oxígeno en los procesos de fotosíntesis, la acuicultura de macroalgas puede contribuir a la mitigación de acidificación y anoxia en las inmediaciones de los cultivos. Esta condición puede tener efectos positivos en cultivos multitróficos integrados con organismos calcificadores. Fernández, Leal y Henríquez (2019) revisan los casos más importantes en los que las granjas de macroalgas pueden funcionar como “refugios químicos” de cocultivos de moluscos como el mejillón y destacan sus posibles aplicaciones en actividades acuícolas de Chile.

El uso del alga roja *Asparagopsis taxiformis* como suplemento en la dieta de rumiantes ha demostrado reducir las emisiones de metano de estos organismos (Roque *et al.*, 2021). El bromoformo, compuesto presente en esta macroalga, tiene funciones anti-metanogénicas en los procesos digestivos del ganado. Aunque no existe un aprovechamiento de esta especie en América Latina, su distribución ubicua la convierte en una excelente candidata para el desarrollo de sus cultivos. En México se estableció una primera granja comercial para el cultivo de *A. taxiformis* en 2023.

El calentamiento del océano y el impacto de anomalías térmicas asociadas (como las olas de calor marinas) puede amenazar la vitalidad y distribución de las comunidades naturales de macroalgas, así como la productividad de macroalgas en cultivo (Kübler, Dudgeon y Bush, 2021). Ante este escenario, actualmente se estudian técnicas de “adaptación asistida” con el fin de mejorar el desempeño biológico de las macroalgas en ambientes con estresores persistentes. Las prácticas de entrecruzamiento o hibridación se llevan realizando con éxito durante años en Chile, en el contexto por ejemplo de la maricultura de *M. pyrifera* (Camus, Faugeton y Buschmann, 2018). Por otro lado, la “inducción de memoria de estrés” es una técnica que busca el endurecimiento fisiológico de macroalgas mediante la exposición a un estrés subletal (proceso denominado “*priming*”). Este proceso genera cambios metabólicos y epigenéticos relacionados con una mayor resistencia a ese tipo de estrés. Esta técnica, cuya efectividad ha sido ampliamente demostrada en cultivos terrestres y más recientemente en macrófitos marinos, emerge como una estrategia prometedora para la adaptación de cultivos de macroalgas al cambio climático (Gauci *et al.*, 2024).

Generación de arrecifes artificiales

Los arrecifes artificiales son estructuras sumergidas que facilitan el asentamiento de algas y otros organismos bentónicos, a la vez que proporcionan refugio y áreas de alimentación para diversas especies marinas. Cuando se combinan con cultivos de

macroalgas, estos sistemas pueden emular la estructura y funciones ecológicas de arrecifes naturales, promoviendo la producción primaria, aumentando la complejidad del hábitat y contribuyendo a la rehabilitación de ecosistemas costeros.

El uso de arrecifes artificiales con cultivos de macroalgas es aún incipiente en América Latina. En México, en la Península de Baja California, se han instalado arrecifes artificiales con el objetivo de recuperar bosques de *M. pyrifera*, los cuales se han visto gravemente afectados por poblaciones barrera de erizos y factores del cambio climático (especialmente el impacto de olas de calor marinas; Arafeh-Dalmau *et al.*, 2019). En Chile, se han explorado iniciativas que combinan arrecifes artificiales con el cultivo de *M. pyrifera* para evaluar el establecimiento de las comunidades del macrobentos y la restauración de comunidades bentónicas perturbadas a escala local (Campos *et al.*, 2020).

El uso de arrecifes artificiales combinados con cultivos de macroalgas presenta varios beneficios ecológicos y socioeconómicos, aunque también enfrenta desafíos técnicos y de gestión. La selección de materiales adecuados, la ubicación precisa de los arrecifes y el monitoreo continuo son factores críticos que pueden definir el éxito de estos proyectos. Dado el creciente interés en la restauración de ecosistemas marinos y la necesidad de desarrollar prácticas acuícolas sostenibles, los arrecifes artificiales combinados con cultivos de macroalgas constituyen una estrategia prometedora para la conservación marina y el desarrollo de la economía azul.

El holobionte en el contexto del cultivo de macroalgas

Las macroalgas forman parte de un holobionte, un sistema biológico que comprende tanto el alga como su comunidad microbiana asociada (bacterias, hongos, virus, protistas), el cual influye en su crecimiento, defensa y aclimatación al ambiente (Egan *et al.*, 2013). El manejo de estas interacciones es esencial para optimizar la salud de las algas y prevenir enfermedades en los cultivos (Li *et al.*, 2023). Para el caso de América Latina, Murúa *et al.* (2024) han presentado recientemente su primer atlas de ficopatologías, que compila distintos patógenos asociados a macroalgas en América Latina, incluyendo su taxonomía, síntomas macro y microscópicos, etiología, hábitat y distribución. Si bien se han identificado numerosos patógenos (virus, bacterias, hongos, pseudohongos, endófitos y parásitos) en macroalgas relevantes económicamente, solo una pequeña fracción se han asociado a macroalgas en cultivo.

En cultivos de *M. pyrifera* en Chile se ha encontrado bacterias del género *Pseudoalteromonas* que posiblemente influyen en el crecimiento del alga. El microbioma epífito de las macroalgas varía entre poblaciones de una misma especie según los factores ambientales predominantes y la fisiología de la macroalga. Florez *et al.* (2019) documentaron estos cambios entre poblaciones de *M. pyrifera* del norte y sur de Chile, adaptadas a condiciones contrastantes de nutrientes y temperatura. En México, Nevarez-Flores *et al.* (2025) estudiaron asimismo las variaciones en el microbioma epífito de *Ulva onhoi* en sistemas de cultivo de pozas, basándose en los trabajos previos de Revilla-Lovano *et al.* (2021) y Zertuche-González *et al.* (2021).

La formación de *biofilms* microbianos en la superficie de las macroalgas puede tener efectos positivos (como la protección frente a desecación y ataque de herbívoros) y negativos (por ejemplo, la promoción de patógenos oportunistas causantes de infecciones). Los virus asociados a macroalgas también influyen en la dinámica del holobionte, modulando la abundancia de ciertas bacterias o incluso afectando la salud del hospedero. En *Kappaphycus alvarezii* cultivada en el Brasil se han observado síntomas de la enfermedad bacteriana del «ice-ice» (Hayashi *et al.*, 2011). *Vibrio owensii* ha sido identificado como patógeno responsable de la enfermedad de blanqueamiento en *Halymenia floresii*, usada en cultivos multitróficos en Yucatán, México (Abdul *et al.*, 2022). *Pythium porphyrae*, causante de la enfermedad del punto rojo, se ha encontrado en *Porphyra* sp. epífita de cultivos de *Gracilaria* (Muñoz, Patiño y Murúa, 2024).

PERSPECTIVA DE BIOSEGURIDAD

Marco regulatorio

Desde hace una década, Rebours *et al.*, (2014) identificaron la oportunidad del aprovechamiento sostenido de las macroalgas comerciales en América Latina y manifestaron la necesidad de establecer un código de “*Buenas Prácticas*” para la cosecha, administración y cultivo de las macroalgas. Méndez *et al.*, (2024) realizaron un extenso estudio sobre la bioseguridad con relación al cultivo de macroalgas en América Latina en seis países: la Argentina, el Brasil, Chile, Colombia, México y el Perú. Sus resultados indicaron que la mayoría de las políticas regionales se centran en temas de prevención, particularmente en problemas de bioseguridad ecológica que son incluidas en las actividades acuícolas en general. Chile destaca por ser el único país que ha desarrollado políticas específicas para macroalgas, en respuesta a los desafíos que ha enfrentado en este sector.

En 2018, la FAO puso en marcha una iniciativa para mejorar la bioseguridad en la acuicultura denominada *Senda Progresiva de Gestión para Mejorar la Bioseguridad en la Acuicultura* (FAO, 2023). Esta consta de cuatro etapas, cada una con un objetivo, resultados clave e indicadores: 1) Definición de riesgos en Materia de Bioseguridad, 2) Puesta en Marcha de Sistemas de Bioseguridad, 3) Mejora de los Sistemas de Bioseguridad y de la Preparación, y 4) Establecimiento de Sistemas Sostenibles de Bioseguridad y Gestión de la Salud. Si bien esta iniciativa está diseñada para la actividad acuícola general y contempla principalmente fauna marina, podría aplicarse al caso del cultivo de las macroalgas. La FAO ha desarrollado programas específicos de bioseguridad en el cultivo de macroalgas en África para el control de enfermedades (TCP/URT/3601/CI: *Support to Seaweed Diseases and Die-off Understanding and Eradication in Zanzibar*). Estas experiencias pueden aplicarse en América Latina.

La introducción de especies exóticas

El cultivo de macroalgas puede provocar la proliferación de algas exóticas invasoras que pueden afectar significativamente la estructura y función de los ecosistemas costeros receptores. La expansión de estas especies en áreas de cultivo no solo afecta la biodiversidad, también puede tener consecuencias económicas y sociales.

El cultivo de echemoides (*K. alvarezii* y *Eucheuma* spp.) ampliamente practicado en Asia y más recientemente en África para la producción de carragenano, se ha visto como una oportunidad para América Latina. Desde finales de la década de 1990, se dieron introducciones de echemoides en Belice, el Brasil, Colombia, Cuba, el Ecuador, México, Panamá y la República Bolivariana de Venezuela. En el Brasil, México y Panamá, estas introducciones se autorizaron bajo algún protocolo establecido por los gobiernos considerando sus legislaciones existentes. Sin embargo, la introducción de especies exóticas con fines comerciales, como el caso de *K. alvarezii* en el Brasil, ha demostrado cómo un cultivo mal gestionado puede convertirse en un problema ecológico (Hayashi *et al.*, 2024). Los fragmentos liberados durante la cosecha o adheridos a equipos y embarcaciones se dispersaron por las corrientes locales, estableciéndose en hábitats cercanos (Araújo *et al.*, 2020). Otros ejemplos de esta problemática incluyen la expansión de *U. pinnatifida* en la Argentina (Bunicontro, Marcomini y Casas, 2019), que compite con especies nativas como *M. pyrifera* (Raffo, Eyra y Iribarne, 2009), y la introducción ilegal de *Saccharina japonica* en Chile y su expansión por las costas de este país (Camus *et al.*, 2022).

Polución biológica de algas de cultivo

La polución biológica asociada con los cultivos de macroalgas se refiere a la alteración genética y ecológica de poblaciones naturales debido a la interacción entre especies cultivadas y nativas. Estas interacciones ocurren mediante la hibridación (*cross-*

breeding), la disminución de la diversidad genética en poblaciones locales y la introducción de cepas cultivadas que compiten o se cruzan con sus contrapartes silvestres. Estos efectos son particularmente relevantes en contextos de acuicultura a gran escala, donde el intercambio de material genético entre algas cultivadas y silvestres es difícil de controlar y puede causar cambios genéticos permanentes en las poblaciones naturales (como en los cultivos de *S. japonica* en China). En Chile, el cultivo intensivo de *G. chilensis* puede contribuir a la dispersión de genotipos seleccionados a escala local (Guillemin *et al.*, 2008). Para mitigar estos riesgos, es crucial implementar estrategias de manejo genético en los cultivos de macroalgas que eviten la polución biológica y la erosión de la diversidad genética en poblaciones silvestres. Entre las medidas preventivas destacan el uso de cepas locales en lugar de cepas exóticas y el desarrollo de barreras genéticas, como el cultivo de individuos estériles. Sin embargo, las regulaciones específicas para cultivos de macroalgas en muchos países, incluidos los de América Latina, siguen siendo limitadas. Esta falta de regulación, sumada a la expansión de la acuicultura sin una evaluación genética adecuada, amenaza la diversidad genética de las poblaciones naturales.

Enfermedades y plagas históricas y emergentes

Los cultivos de macroalgas, como otras formas de acuicultura, son susceptibles a una amplia gama de enfermedades y plagas que afectan su crecimiento, rendimiento y calidad. Los principales agentes causantes son microorganismos patógenos (hongos, bacterias y virus) y pequeños organismos que actúan como parásitos o compiten por espacio y recursos (Murúa *et al.*, 2023). A nivel global, la intensificación del cultivo de macroalgas y la falta de prácticas de manejo adecuadas han incrementado la incidencia de estas enfermedades, lo que ha generado pérdidas económicas significativas que amenazan la sostenibilidad de los cultivos (Spagnuolo y Genovese, 2024).

En América Latina, la expansión de la industria de macroalgas ha traído consigo nuevos desafíos relacionados con enfermedades emergentes. Uno de los casos más relevantes a nivel mundial es el de la enfermedad conocida como “ice-ice” en *Kappaphycus* y *Eucheuma*, que afecta a las principales especies cultivadas para la producción de carragenina en el Sudeste Asiático y el Brasil (Tahiluddin y Terzi, 2021).

El manejo de enfermedades y plagas en cultivos de macroalgas es complejo y requiere un enfoque integrado que incluya el monitoreo ambiental, la identificación de patógenos y su control de manera temprana. Sin embargo, la escasez de infraestructura para el diagnóstico y la investigación en patología de algas limita la capacidad de respuesta, lo que puede resultar en brotes de enfermedades y plagas con consecuencias devastadoras para la industria.

Mejoramiento de cepas

La modificación genética de las macroalgas cultivadas mediante técnicas de biología sintética representa un medio muy eficaz para aumentar la eficiencia de la producción acuícola y disminuir su huella ambiental (Charrier *et al.*, 2015). Esto es especialmente relevante en un escenario adverso de cambio climático y de impacto de distintos estresores antropogénicos. Sin embargo, existe un sector importante de la sociedad que rechaza la producción y el consumo de organismos genéticamente modificados, tanto es así que existen certificaciones internacionales para amparar productos alimenticios sin modificación genética. Los alimentos certificados como no modificados genéticamente obtienen un mayor valor en el mercado. Esta situación ha impulsado investigaciones, principalmente en la agricultura, para la mejora de cepas sin aplicar ingeniería genética.

Como alternativa a la ingeniería genética, las prácticas de entrecruzamiento selectivo o hibridación inter e intraespecífica se aplican desde hace décadas para obtener cepas de macroalgas resistentes a estrés abiótico. Estas prácticas de hibridación interespecífica se han extendido a diferentes géneros de macroalgas de interés comercial, generando cepas

mejoradas y genéticamente estables. La hibridación de macroalgas se fundamenta en el principio de heterosis o “vigor híbrido”, un estado genético donde ciertas características otorgan a la descendencia un mejor desempeño que la de sus progenitores. En Chile, desde hace años se evalúan los perfiles genéticos y fenotípicos de *M. pyrifera* para desarrollar programas de entrecruzamientos selectivos (Camus, Faugeron y Buschmann, 2018).

CONCLUSIONES

América Latina posee un alto potencial en el aprovechamiento sostenible de las macroalgas marinas mediante su cultivo marino y costero. Si bien su estado de desarrollo es incipiente, existe un creciente interés en su implementación a través de iniciativas nacionales e internacionales.

La acuicultura de macroalgas, desde una perspectiva ecológica, genera tanto impactos positivos como negativos en el medio ambiente. Actividades como la AMTI, cuando se implementan correctamente, permiten un aprovechamiento de los recursos marinos con un menor impacto ambiental. Asimismo, las actividades de repoblamiento o generación de arrecifes artificiales permiten la restauración de ambientes. Sin embargo, el cultivo de macroalgas también conlleva riesgos ambientales que requieren medidas de bioseguridad específicas. Entre estos riesgos destacan la introducción de especies exóticas, la polución biológica de algas de cultivo y desarrollo de enfermedades. Además, el desarrollo del cultivo de macroalgas implica la mejora de cepas, particularmente ante el cambio climático, y esta una actividad también necesita regulación. No obstante, no existe un marco legal regional que contemple estas medidas de bioseguridad.

RECOMENDACIONES

Ante las oportunidades e iniciativas que se presentan actualmente en América Latina, es indispensable y urgente establecer un marco legal que minimice los riesgos inherentes de bioseguridad e impacto ambiental relacionados al cultivo de macroalgas en la región.

Las iniciativas de la FAO, como el Código de Conducta para la Pesca Responsable y las nuevas Directrices para la Acuicultura Sostenible, así como las experiencias de Chile, México y el Brasil, pueden constituir la base del desarrollo de una normativa regional específica que promueva el cultivo comercial de macroalgas.

Es necesario establecer un consorcio que integre la participación regular de los actores del sector productivo en la acuicultura de macroalgas, así como de sus autoridades gubernamentales correspondientes, con el fin de intercambiar experiencias y homogenizar criterios de regulación para América Latina.

REFERENCIAS

- Abdul Malik, S., Saha, M., Taupin, L., Bedoux, G., Bourgougnon, N. y Robledo, D. 2022. Identification of the quorum sensing signal of the opportunistic pathogen inducing bleaching disease in the red macroalga *Halymenia floresii* holobiont. *Applied Phycology*, 3(1): 109–119. <https://doi.org/10.1080/26388081.2022.2086483>
- Alemañ, A. E., Robledo, D. y Hayashi, L. 2019. Development of seaweed cultivation in Latin America: current trends and future prospects. *Phycologia*, 58: 462–471. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1640996>
- Arafah-Dalmau, N., Montaña-Moctezuma, G., Martínez, J.A., Beas-Luna, R., Schoeman, D.S. y Torres-Moye, G. 2019. Extreme marine heatwaves alter kelp forest community near its equatorward distribution limit. *Frontiers in Marine Science*, 6: 499. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00499>
- Araújo, P.G., Nardelli, A.E., Gelli, V.C., Fujii, M.T. y Chow, F. 2020. Monitoring environmental risk of the exotic species *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta), after two decades of introduction in southeastern Brazil. *Botánica Marina*, 63(6): 551–558. <https://doi.org/10.1515/bot-2020-0052>

- Bunicontro, M.P., Marcomini, S.C. y Casas, G.N. 2019. *Environmental impacts of an Alien Kelp species (Undaria pinnatifida, Laminariales) along the Patagonian coasts*. En: *Impacts of Invasive Species on Coastal Environments: Coasts in Crisis* (pp. 373–396). https://doi.org/10.1007/978-3-319-91382-7_10
- Buschmann, A.H., Hernández-González, M.C. y Varela, D. 2008. Seaweed future cultivation in Chile: perspectives and challenges. *International Journal of Environment and Pollution*, 33(4): 432–456. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2008.020571>
- Buschmann, A.H., Camus, C., Infante, J., Neori, A., Israel, Á., Hernández-González, M.C. y Critchley, A.T. 2017. Seaweed production: overview of the global state of exploitation, farming and emerging research activity. *European Journal of Phycology*, 52(4): 391–406. <https://doi.org/10.1080/09670262.2017.1365175>
- Campos, L., Ortiz, M., Rodríguez-Zaragoza, F.A. y Oses, R. 2020. Macrobenthic community establishment on artificial reefs with *Macrocystis pyrifera* over barren-ground and soft-bottom habitats. *Global Ecology and Conservation*, 23: e01184. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01184>
- Camus, C., Infante, J. y Buschmann, A.H. 2018. Overview of 3 years precommercial seafarming of *Macrocystis pyrifera* along the Chilean coast. *Reviews in Aquaculture*, 10(3): 543–559. <https://doi.org/10.1111/raq.12185>
- Camus, C., Faugeron, S. y Buschmann, A.H. 2018. Assessment of genetic and phenotypic diversity of the giant kelp, *Macrocystis pyrifera*, to support breeding programs. *Algal Research*, 30: 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.01.004>
- Camus, C., Leal, P.P., Faugeron, S., Henríquez-Antipa, L.A., Fernández, P.A., Cook, S. y Buschmann, A.H. 2022. First report of the intentionally introduced kelp, *Saccharina japonica*, in the Pacific coast of southern Chile. *Algal Research*, 65: 102750. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102750>
- Charrier, B., Rolland, E., Gupta, V. y Reddy, C.R.K. 2015. Production of genetically and developmentally modified seaweeds: exploiting the potential of artificial selection techniques. *Frontiers in Plant Science*, 6: 127. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00127>
- Chung, I.K., Oak, J.H., Lee, J.A., Shin, J.A., Kim, J.G. y Park, K.S. 2013. Installing kelp forests/seaweed beds for mitigation and adaptation against global warming: Korean Project Overview. *ICES Journal of Marine Science*, 70(5): 1038–1044. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss206>
- Duarte, C.M., Wu, J., Xiao, X., Bruhn, A. y Krause-Jensen, D. 2017. Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation? *Frontiers in Marine Science*, 4: 100. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00100>
- Egan, S., Harder, T., Burke, C., Steinberg, P., Kjelleberg, S. y Thomas, T. 2013. The seaweed holobiont: understanding seaweed–bacteria interactions. *FEMS Microbiology Reviews*, 37(3): 462–476. <https://doi.org/10.1111/1574-6976.12011>
- FAO. 2023. The Progressive Management Pathway for Aquaculture Biosecurity – Guidelines for application. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*, No. 689. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc6858en>
- Fernández, P.A., Leal, P.P. y Henríquez, L.A. 2019. Co-culture in marine farms: macroalgae can act as chemical refuge for shell-forming mollusks under an ocean acidification scenario. *Phycologia*, 58(5): 542–551. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1628576>
- Florez, J.Z., Camus, C., Hengst, M.B., Marchant, F. y Buschmann, A.H. 2019. Structure of the epiphytic bacterial communities of *Macrocystis pyrifera* in localities with contrasting nitrogen concentrations and temperature. *Algal Research*, 44: 101706. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101706>
- Gauci, C., Jueterbock, A., Khatei, A., Hoarau, G. y Bartsch, I. 2024. Thermal priming of *Saccharina latissima*: a promising strategy to improve seaweed production and restoration in future climates. *Marine Ecology Progress Series*, 745: 59–71. <https://doi.org/10.3354/meps14683>

- Guillemin, M.L., Faugeron, S., Destombe, C., Viard, F., Correa, J.A. y Valero, M. 2008. Genetic variation in wild and cultivated populations of the haploid–diploid red alga *Gracilaria chilensis*: how farming practices favor asexual reproduction and heterozygosity. *Evolution*, 62(6): 1500–1519. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2008.00373.x>
- Hayashi, L., Santos, A.A., Faria, G.S., Nunes, B.G., Souza, M.S., Fonseca, A.L. y Bouzon, Z.L. 2011. *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Areschougaceae) cultivated in subtropical waters in Southern Brazil. *Journal of Applied Phycology*, 23: 337–343. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-010-9543-5>
- Hayashi, L., Bulboa, C., Kradolfer, P., Soriano, G. y Robledo, D. 2014. Cultivation of red seaweeds: a Latin American perspective. *Journal of Applied Phycology*, 26: 719–727. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-013-0143-z>
- Hayashi, L., dos Santos, A.A., Ventura, T.F.B., Landuci, F.S., Gelli, V.C. y Castelar, B. 2024. *Kappaphycus alvarezii* farming in Brazil: A brief summary and current trends. En: Tropical Phyconomy Coalition Development: Focus on Eucheumatoid Seaweeds (pp. 115–127). *Springer Nature*. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-47806-2_10
- Li, J., Weinberger, F., de Nys, R., Thomas, T. y Egan, S. 2023. A pathway to improve seaweed aquaculture through microbiota manipulation. *Trends in Biotechnology*, 41(4): 545–556. [https://www.cell.com/trends/biotechnology/abstract/S0167-7799\(22\)00221-9](https://www.cell.com/trends/biotechnology/abstract/S0167-7799(22)00221-9)
- Jung, S., Chau, T.V., Kim, M. y Na, W.B. 2022. Artificial seaweed reefs that support the establishment of submerged aquatic vegetation beds and facilitate ocean macroalgal afforestation: a review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(9): 1184. <https://doi.org/10.3390/jmse10091184>
- Kübler, J.E., Dudgeon, S.R. y Bush, D. 2021. Climate change challenges and opportunities for seaweed aquaculture in California, the United States. *Journal of the World Aquaculture Society*, 52(5): 1069–1080. <https://doi.org/10.1111/jwas.12794>
- Matias, M.G., Arenas, F., Rubal, M. y Pinto, I.S. 2015. Macroalgal composition determines the structure of benthic assemblages colonizing fragmented habitats. *PLoS ONE* 10: e0142289. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142289>
- Méndez, C.D., Bustamante, E., Calderon, M.S., Gauna, C., Hayashi, L., Robledo, D., Tapia-Larios, C., Campbell, I., Westermeier, R. y Murúa, P. 2024. Biosecurity baseline for a sustainable development of seaweed aquaculture in Latin America. *Marine Policy*, 159: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105933>
- Muñoz, L., Patiño, D.J. y Murúa, P. 2024. Natural biocontrol of a *Porphyra* sp. pest on farmed *Gracilaria chilensis* by a pythiosis outbreak. *Journal of Applied Phycology*: 1–9. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-024-03228-8>
- Murúa, P., Garvetto, A., Egan, S. y Gachon, C.M. 2023. The reemergence of phycopathology: When algal biology meets ecology and biosecurity. *Annual Review of Phytopathology*, 61(1): 231–255. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-120425>
- Murúa, P., Muñoz, L., Bustamante, D., Gauna, C., Hayashi, L., Robledo, D. y Gachon, C.M. 2024. The first phycopathological atlas in Latin America unveils the underdocumentation of algal pathogens. *Algal Research*, 82: 103604. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103604>
- Nevarez-Flores, E., Cruz-López, R., Zertuche-González, J.A., Maske, H., Ferreira-Arrieta, A., Altamirano-Gómez, Z. y Sandoval-Gil, J.M. 2025. Bacterial community dynamics on the seaweed *Ulva obnoi* during a full cultivation cycle in a land-based aquaculture pond system. *Algal Research* 85: 103847. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103847>
- Paine, E.R., Schmid, M., Boyd, P.W., Diaz-Pulido, G. y Hurd, C.L. 2021. Rate and fate of dissolved organic carbon release by seaweeds: a missing link in the coastal ocean carbon cycle. *Journal of Phycology*, 57(5): 1375–1391. <https://doi.org/10.1111/jpy.13198>

- Pellizzari, F. y Reis, R.P. 2011. Seaweed cultivation on the southern and southeastern Brazilian coast. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 21: 305–312. <https://doi.org/10.1590/S0102-695X2011005000057>
- Pereira, R., Yarish, C. y Critchley, A.T. 2024. Seaweed aquaculture for human foods in land-based and IMTA systems. En: *Applications of Seaweeds in Food and Nutrition*: 77–99. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91803-9.00016-0>
- Raffo, M.P., Eyra, M.C. y Iribarne, O.O. 2009. The invasion of *Undaria pinnatifida* to a *Macrocystis pyrifera* kelp in Patagonia (Argentina, south-west Atlantic). *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 89(8): 1571–1580. <https://doi.org/10.1017/S002531540900071X>
- Rebours, C., Marinho-Soriano, E., Zertuche-González, J. A., Hayashi, L., Vásquez, J. A., Kradolfer, P. y Robledo, D. 2014. Seaweeds: an opportunity for wealth and sustainable livelihood for coastal communities. *Journal of Applied Phycology*, 26: 1939–1951. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-014-0304-8>
- Revilla-Lovano, S., Sandoval-Gil, J.M., Zertuche-González, J.A., Belando-Torrentes, M.D., Bernardeau-Esteller, J., Rangel-Mendoza, L.K., Ferreira-Arrieta, A., et al. 2021. Physiological responses and productivity of the seaweed *Ulva ohnoi* (Chlorophyta) under changing cultivation conditions in pilot large land-based ponds. *Algal Research*, 56: 102316. <http://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102316>
- Roque, B.M., Venegas, M., Kinley, R.D., de Nys, R., Duarte, T.L., Yang, X. y Kebreab, E. 2021. Red seaweed (*Asparagopsis taxiformis*) supplementation reduces enteric methane by over 80 percent in beef steers. *Plos One*, 16(3): e0247820. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247820>
- Ross, F. W., Boyd, P. W., Filbee-Dexter, K., Watanabe, K., Ortega, A., Krause-Jensen, D. y Macreadie, P.I. 2023. Potential role of seaweeds in climate change mitigation. *Science of the Total Environment*, 885: 163699. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163699>
- Spagnuolo, D. y Genovese, G. 2024. Macroalgal diseases: Exploring biology, pathogenesis, and management strategies. *Phycology*, 4(3): 450–464. <https://doi.org/10.3390/phycolgy4030026>
- Tahiluddin, A. y Terzi, E. 2021. Ice-ice disease in commercially cultivated seaweeds *Kappaphycus* spp. and *Eucheuma* spp.: A review on the causes, occurrence, and control measures. *Marine Science and Technology Bulletin*, 10(3): 234–243. <https://doi.org/10.33714/masteb.917788>
- Troell, M., Halling, C., Nilsson, A., Buschmann, A.H., Kautsky, N. y Kautsky, L. 1997. Integrated marine cultivation of *Gracilaria chilensis* (Gracilariales, Rhodophyta) and salmon cages for reduced environmental impact and increased economic output. *Aquaculture*, 156(1–2): 45–61. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(97\)00080-X](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00080-X)
- Troell, M., Henriksson, P.J., Buschmann, A.H., Chopin, T. y Quahe, S. 2023. Farming the ocean—seaweeds as a quick fix for the climate? *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 31(3): 285–295. <https://doi.org/10.1080/23308249.2022.2048792>
- Wang, Q., Sun, X., Lin, S., Dong, Y., Shen, H., He, Z. y Yang, Y. 2025. Large-scale seaweed cultivation as a nature solution for carbon-negative economy and restorative environmental stewardship: Lessons from China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207: 114954. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114954>
- Zertuche-González, J.A., Sandoval-Gil, J.M., Rangel-Mendoza, L.K., Gálvez-Palazuelos, A.I., Guzmán-Calderón, J.M. y Yarish, C. 2021. Seasonal and interannual production of sea lettuce (*Ulva* sp.) in outdoor cultures based on commercial size ponds. *Journal of the World Aquaculture Society*, 52(5): 1047–1058. <https://doi.org/10.1111/jwas.12773>
- Zertuche-González, J.A., Sandoval-Gil, J.M., Sanchez-Barredo, M., Altamirano-Gómez, Z., Guzmán-Calderón, J.M., Rangel-Mendoza, L.K. y Yarish, C. 2022. *Eisenia arborea* (Areschoung) domestication and mariculture development on the Pacific coast of Baja California, México. *Frontiers in Marine Science*, 9: 932534. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.932534>

Perspectiva técnica de las tecnologías de cultivo de macroalgas en América Latina y el Caribe

Carolina Camus y Alejandro H. Buschmann

*Universidad de Los Lagos
Puerto Montt, Chile*

Camus, C. y Buschmann, A.H. 2025. *Perspectiva técnica de las tecnologías de cultivo de macroalgas en América Latina y el Caribe*. En: Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Murúa Andrade, P. y Farías Molina, A. (coords.). Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 24-26 de junio de 2024, Puerto Varas, Chile. *FAO Actas de Pesca y Acuicultura*. N.º 74. Roma, FAO. pp. 79-91.

RESUMEN

El cultivo de macroalgas marinas es aún incipiente en América Latina y el Caribe, aunque existe experiencia con el alga roja *Gracilaria chilensis*. Este trabajo analiza la producción de las especies de macroalgas cultivadas en América Latina y el Caribe, los sistemas de cultivo utilizados y sus ventajas y desventajas en términos de productividad, riesgos ambientales y consecuencias económicas. Los antecedentes indican que el cultivo se basa principalmente en macroalgas clonales propagadas por fragmentación del talo. Los cultivos que requieren tecnologías más avanzadas, como el cultivo de diferentes fases del ciclo de vida y la reproducción sexual, no están presentes a nivel productivo. En consecuencia, las actividades de investigación básica y aplicada son un requisito fundamental para promover el desarrollo de esta actividad en la región. Por otro lado, las regulaciones en línea con los sistemas de producción de macroalgas parecen necesarias para permitir el desarrollo sostenible de las macroalgas.

INTRODUCCIÓN

En 2021, la producción mundial de macroalgas alcanzó los 36,3 millones de toneladas (peso fresco), de las cuales el 97 % procedía de la acuicultura y el 3 % de la recolección en praderas naturales (FAO, 2023). La producción acuícola presenta un marcado desequilibrio regional, dominado por tres países asiáticos: China (59,5 %), Indonesia (24,6 %) y la República de Corea (5,1 %), que en conjunto aportan cerca del 90 % de la producción mundial (FAO, 2023). América Latina y el Caribe contribuyeron con un 1,9 % de la producción mundial de macroalgas en 2021 (FAO, 2023). Sin embargo, a diferencia de Asia, en estas regiones la mayor parte procede de la recolección silvestre (95,5 %), mientras que el cultivo representa solo el 4,5 % de la producción total de América Latina y el Caribe (FAO, 2023). En la región, el desarrollo del cultivo de macroalgas se ha limitado a seis países de América Latina (el Brasil, Chile, el Ecuador, México, el Perú y la República Bolivariana de Venezuela) y seis del Caribe insular (Antigua y Barbuda, Belice, Granada, Saint Kitts y Nevis, San Vicente y las Granadinas y Santa Lucía). En estas regiones se producen comercialmente cuatro especies (*Gracilaria*

chilensis, *Kappaphycus alvarezii*, *Eucheuma* spp. y *Ulva* spp.) y se están llevando a cabo ensayos experimentales con otras ocho especies. Las técnicas de cultivo empleadas en estas regiones se basan en las utilizadas por acuicultores asiáticos: sistemas de redes flotantes para especies foliosas de pequeño tamaño (como *Porphyra/Pyropia*), cultivos de fondo para corticadas delgadas (*Gracilaria* spp.), cultivos suspendidos o flotantes a media agua para especies corticadas gruesas (*Eucheuma* spp. y *Kappaphycus alvarezii*) y cultivos en aguas profundas para Laminariales (*Macrocystis pyrifera*).

En América Latina y el Caribe, la aplicación de tecnologías de cultivo sigue siendo incipiente debido al bajo valor de la biomasa producida, que se comercializa principalmente en forma de alga seca destinada a la industria de los hidrocoloides. El cultivo de las diferentes especies se basa, principalmente, en la propagación vegetativa o clonal de talos y, en menor medida, en la producción de plántulas mediante reproducción sexual. Esta situación supone un desafío para el desarrollo de la industria, ya que afecta la sostenibilidad del recurso desde el punto de vista genético, incrementando el riesgo de enfermedades y pestes, como se ha evidenciado en *G. chilensis* en Chile y las eucheumatoides en Asia. En este informe, se presentan las especies de macroalgas cultivadas en América y el Caribe entre 2000 y 2021, sus estadísticas de producción y los sistemas de cultivo utilizados. Posteriormente, se analizan sus ventajas y desventajas en términos de productividad, riesgos ambientales y consecuencias económicas.

PRODUCCIÓN DE MACROALGAS EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

Según las estadísticas de pesca y acuicultura de la FAO en el periodo 2000-2021, un total de 13 países de América Latina y el Caribe registraron desembarques de macroalgas (FAO, 2023). De ellos, 12 reportaron producción por acuicultura, mientras que solo cuatro realizaron extracción de macroalgas silvestres durante ese periodo (Figura 1). Durante la primera mitad de la década de 2000, únicamente seis países declararon producción de macroalgas por cultivo, concentrándose exclusivamente en macroalgas rojas de los géneros *Eucheuma*, *Kappaphycus*, *Pyropia* spp. y *Gracilaria*. Las producciones fueron inferiores a las 100 toneladas de peso fresco, exceptuando *G. chilensis* en Chile, que en algunos años superó las 30 000 toneladas de peso fresco (Cuadro 1). Esta tendencia hacia la producción principalmente de agarofitas y carragenofitas se mantuvo hasta el inicio de 2010, cuando aumentó el número de países productores sin diversificarse las especies cultivadas. Solo se registró la incorporación del cultivo de macroalgas pardas en Chile, México y Perú (Cuadro 1). Sin embargo, el cultivo de macroalgas pardas de los géneros *Durvillaea*, *Sargassum*, *Eisenia* y *Macrocystis* parece limitarse a experiencias incipientes o experimentales, dada su reducida y esporádica biomasa declarada. Respecto a las macroalgas verdes, resulta notable su ausencia en las estadísticas de la FAO, considerando que México produce comercialmente *Ulva lactuca* y *U. fasciata* en cultivos terrestres, con una productividad promedio anual de 180 gramos de peso vivo $m^{-2} d^{-1}$ y una producción de 95 toneladas (Vázquez-Delfin *et al.*, 2019; J. Zertuche-González, comunicación personal, 2024).

La acuicultura de especies de los géneros *Kappaphycus* y *Eucheuma* en América Latina y el Caribe merece especial atención, ya que nueve países desarrollan actualmente su cultivo comercial y experimental (Cuadro 1 y Cuadro 2). La especie más cultivada es *K. alvarezii*, introducida en Martinica en los años 80 y posteriormente en el Brasil y la República Bolivariana de Venezuela a mediados de los 90 (Hayashi *et al.*, 2014; Ask *et al.*, 2003). Por su parte, *E. isiforme* es una especie endémica del Caribe que se cultiva en Antigua, Barbuda y Belice. En 2002, se declaró el cultivo de *Euchema spinosum* en la República Bolivariana de Venezuela, aunque se desconoce su origen en América. Desde entonces, las estadísticas solo registran declaraciones de *Eucheuma* spp., lo que impide identificar con precisión qué especies se cultivan en los países de la región.



CUADRO 1
Producción mundial de acuicultura de macroalgas en América Latina y el Caribe entre los años 2000 y 2021

País	Especies	Toneladas peso fresco																					
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Antigua y Barbuda	<i>Euclidean isiforme</i>	5	5	5	5	5	5	5	5	8	8	8	8	8	8	8	10	10	10	10	10	10	10
Belice	<i>Euclidean isiforme</i>												3,6	10	2,2	3	3	3	3	4	5	5	5
Brasil	<i>Kappaphycus alvarezii</i>								300	500	700	700	700	700	700	700	700	700	700	1 000	1 000	1 000	1 080
	<i>Gracilaria</i> spp.							20	20	20	30	30	30	30	30	30	30	30	50	50	50	50	50
Chile	<i>Pyropia</i> spp.				29	7	1																
	<i>Durvillaea</i> spp.								1	5	12				2					0,51	2		2
	<i>Salpeltis skottsbergii</i>																					1	1
	<i>Gracilaria chilensis</i>	33 471	65 538	71 648	40 050	20 266	15 492	33 586	23 668	21 686	88 147	12 150	14 469	4 111	12 460	12 808	11 952	14 846	16 725,22	20 704,69	21 672	18 268	15 565
	<i>Sarcothalia crispata</i>																					5	
Ecuador	<i>Kappaphycus alvarezii</i>														35	40	60	60	60	60	60	0,4	100
Granada	<i>Euclidean</i> spp.															1,4	22,1	18	20	22	22	22	22
	<i>Sargassum</i> spp.															20							
México	Macroalgas pardas																23,86	23,86	30	10			
	<i>Pyropia/Porphyra</i>													15,4			1,58	1,27	1,55	1			
Perú	<i>Chondracanthus chamosoi</i>													130,65	44	2							
	<i>Gracilaria lemaneiformis</i>	11	12																				
	<i>Macrocystis pyrifera</i>																			5			
	<i>Kappaphycus alvarezii</i>																				1	1	1
Saint Kitts y Nevis	<i>Euclidean</i> spp.																0,2	0,5	0,5				
	<i>Kappaphycus alvarezii</i>																			1	0,24	13,07	13
San Vicente y Las Granadinas	<i>Kappaphycus alvarezii</i>																						
	<i>Euclidean</i> spp.														0,5	1,4	1,4	1,4	1,1				
Santa Lucía	<i>Euclidean</i> spp.	28	16	20	5	14	5,2	10	6,8	12,1	15,4	10,9	14,9	26	20,6	2,3	5,3	14	45	102,5	82,49	204,17	
	<i>Gracilaria</i> spp.						4,5																
Venezuela (República Bolivariana de)	<i>Kappaphycus alvarezii</i>	95	25																	100	4 275	4 500	4 500
	<i>Euclidean spinosum</i>			160																	1	1	1

Fuente: FAO. 2023. Estadísticas de pesca y acuicultura. Producción mundial de acuicultura 1950–2021. En: FishStat. Roma. [Consultado el 1 de marzo de 2024]. <https://www.fao.org/fishery/es/statistics/software/fishstatj>

TECNOLOGÍA DE SISTEMA DE CULTIVO EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

La infraestructura y los sistemas de cultivo utilizados para la producción de macroalgas dependen principalmente de la especie a cultivar y de sus condiciones ambientales ideales para su crecimiento (Santelices, 1996; Santelices, 1999). Desde hace décadas se sabe que la relación entre la superficie y el volumen es un factor clave que influye en la productividad de las macroalgas marinas (Littler y Littler, 1980). Esta característica, vinculada a la tasa fotosintética y la capacidad de absorción de nutrientes de las macroalgas, es fundamental para determinar el sistema de cultivo apropiado. El conocimiento de sus ciclos de vida y la capacidad de manejar las distintas fases del desarrollo permite clasificar las macroalgas en clonales y no clonales, lo que define si el cultivo se llevará a cabo en un paso o en múltiples pasos (Santelices, 1999). Las macroalgas clonales se propagan mediante la fragmentación de unidades genéticamente idénticas, que luego se multiplican para ser sembradas en el sistema de producción marino (cultivo en un paso) (Santelices, 1999). En cambio, las macroalgas no clonales requieren un *hatchery*, o infraestructura con condiciones controladas de parámetros ambientales, para manejar sus esporas o gametos. Esto permite su asentamiento en sustratos (generalmente cabos), donde continuará su reproducción, crecimiento y posterior siembra en el mar (cultivo de múltiples pasos) (Santelices, 1999). Estas circunstancias determinarán, en última instancia, el tipo de sistema de cultivo a utilizar.

A nivel mundial existen diversos sistemas de cultivo de macroalgas. Estos van desde sistemas de fondo, sistemas suspendidos con redes o líneas flotantes, así como también en piscinas y biorreactores instalados en tierra (Verdegem *et al.*, 2023). No obstante, la mayor parte de los cultivos mundiales han evolucionado hacia sistemas suspendidos o flotantes, debido a que la luz disminuye rápidamente con la profundidad del área de cultivo. El desarrollo de tecnologías de cultivo flotante cerca de la superficie ha permitido mejorar la productividad y al mismo tiempo expandir el cultivo de macroalgas marinas hacia regiones más alejadas de la costa. En consecuencia, en la actualidad la mayoría de los cultivos de macroalgas utilizan técnicas de cultivo superficial. El notable crecimiento en la producción de Laminariales, *Pyropia/Porphyra* y de *Euclima/Kappaphycus* en las últimas décadas confirma esta tendencia (Naylor *et al.*, 2021).

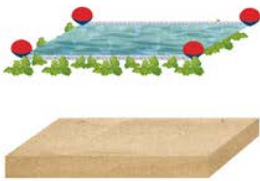
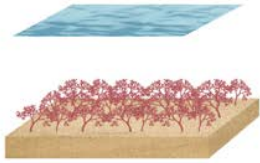
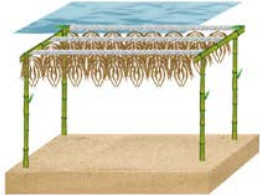
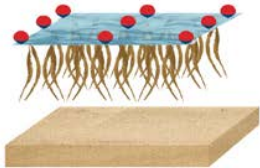
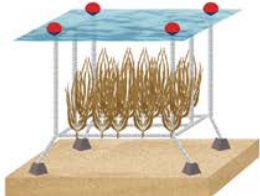
En América Latina y el Caribe se utilizan principalmente cuatro sistemas de cultivo: redes flotantes para especies foliosas de pequeño tamaño (*Porphyra/Pyropia*), cultivos suspendidos o flotantes a media agua para especies corticadas gruesas (*Euclima* y *Kappaphycus*), sistemas en aguas más profundas para Laminariales (*Macrocystis pyrifera*) y cultivos de fondo para macroalgas con talos corticados y delgados (*Gracilaria* spp.) (Figura 2, Cuadro 2).

La mayoría de los cultivos comerciales de macroalgas en la región se concentran en la producción de agarofitas (*Gracilaria* spp.) y carragenofitas (*K. alvarezii* y *Euclima* spp.), utilizando el cultivo de fondo o en líneas flotantes, respectivamente (Figura 2, Cuadro 2). La especie de macroalga más exitosamente cultivada en la región, *G. chilensis*, utiliza sistemas de cultivo de fondo donde los talos se fijan a sedimentos arenosos y fangosos mediante cuerdas o se entierran directamente en el sustrato con una horquilla (Buschmann, Westermeier y Retamales, 1995). Estos sistemas se establecen en marismas intermareales y zonas submareales someras protegidas del oleaje, principalmente en el sur de Chile (Camus, Hernández-González y Buschmann, 2019). Esta actividad se mantiene gracias a la capacidad de procesamiento del hidrocoloide agar existente en el país (Camus, Hernández-González y Buschmann, 2019).

Siguiendo el modelo de cultivo de *Kappaphycus* y *Euclima* en Filipinas e Indonesia, *G. chilensis* se ha cultivado en cuerdas atadas a estacas en sistemas submareales someros del sur de Chile (Westermeier, Gómez y Rivera, 1993). Los sistemas de líneas flotantes se utilizan principalmente para cultivar *Kappaphycus/Euclima* en América Latina y el Caribe (Figura 2, Cuadro 2). Con esta metodología, *Kappaphycus alvarezii* ha

logrado un crecimiento productivo más significativo en el Brasil y en la República Bolivariana de Venezuela, alcanzando en 2021 entre 1 080 y 4 500 toneladas de peso fresco, respectivamente (Cuadro 1). Sin embargo, estos sistemas también se han probado con *G. chilensis*, tanto mediante propagación clonal como mediante siembra de esporas en cuerdas (Alveal *et al.*, 1997; Halling *et al.*, 2005).

FIGURA 2
Diagramas ejemplificando los distintos tipos de sistemas de cultivos utilizados para diferentes grupos funcionales de macroalgas

Sistema de cultivo	Grupo funcional	Especies representativas
Redes flotantes 	Foliosas	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Pyropia</i> • <i>Porphyra</i> • <i>Ulva</i>
Cultivo de fondo 	Corticadas delgadas	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Gracilaria</i>
Cultivo suspendido a media agua 	Corticadas gruesas	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Eucheuma</i> • <i>Kappaphycus</i>
Cultivo suspendido para laminariales no flotantes 	Laminariales no flotantes	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Lessonia</i> • <i>Ecklonia</i> • <i>Eisenia</i>
Cultivo suspendido para laminariales flotantes formadoras de dosel 	Laminariales flotantes formadoras de dosel	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Macrocystis</i>

Fuente: Modificado de Santelices, B. 1999. A conceptual framework for marine agronomy. *Hydrobiologia*, 398/399: 15–23. <https://doi.org/10.1023/A:1017053413126>

CUADRO 2

Especies de macroalgas cultivadas en América Latina y el Caribe señalando los sistemas de cultivo, sus usos y mercados

Especie Cultivada	País	Escala Cultivo	Sistema de Cultivo		Usos		Mercado
			Primario	Secundario	Primario	Secundarios	
AMÉRICA LATINA							
<i>Sargassum</i> spp.	México	Experimental	Desconocido		Alginato		Interno
Macroalgas Pardas		Experimental	Líneas flotantes		Alginato	Alimento abulón	Interno
<i>Ulva</i> spp.		Comercial a pequeña escala	Raceways		Alimento		Exportación
<i>Kappaphycus alvarezii</i>	Ecuador	Experimental	Líneas flotantes				Interno
<i>Pyropia/Porphyra</i>	Perú	Experimental	Redes flotantes		Alimento		Interno
<i>Chondracanthus chamissoi</i>		Experimental	Líneas flotantes		Alimento		Interno
<i>Gracilaria lemaneformis</i>		Experimental	Líneas flotantes				Interno
Macroalgas pardas		Experimental	Líneas flotantes		Alginato		Exportación
<i>Gracilaria chilensis</i>	Chile	Comercial	Fondo	Líneas flotantes	Agar		Exportación
<i>Salcopeltis skottsbergii</i>		Experimental	Líneas flotantes		Carragenina		Exportación
<i>Durvillaea</i> spp.		Experimental	Líneas flotantes		Alimento	Alginato	Interno/Exportación
<i>Pyropia</i> spp.		Experimental	Redes flotantes		Alimentación		Interno/Exportación
<i>Sarcothalia crispata</i>		Experimental	Líneas flotantes		Carragenina		Exportación
<i>Macrocystis pyrifera</i>		Producción Piloto	Líneas flotantes		Alimento Animal	Alginato	Exportación
<i>Kappaphycus alvarezii</i>	Brasil	Comercial	Líneas flotantes		Bioestimulantes de uso agronómico		Interno
<i>Gracilaria</i> spp.		Experimental	Líneas flotantes		Actividades de sustento de pequeños pescadores		Interno
<i>Kappaphycus alvarezii</i>	Venezuela (República Bolivariana de)	Comercial	Líneas flotantes		Carragenina		Exportación
<i>Euclidean spinosum</i>		Experimental	Líneas flotantes		Carragenina		Interno
CARIBE							
<i>Euclidean isiforme</i>	Belice	Comercial a pequeña escala	Líneas flotantes		Alimento		Interno
<i>Euclidean</i> spp.	Saint Kitts y Nevis	Comercial a pequeña escala	Líneas flotantes		Alimento		Interno
<i>Kappaphycus alvarezii</i>		Comercial a pequeña escala	Líneas flotantes		Alimento		Interno
<i>Euclidean</i> spp.	Santa Lucía	Comercial a pequeña escala	Líneas flotantes		Alimento		Interno
<i>Gracilaria</i> spp.		Comercial a pequeña escala	Líneas flotantes		Alimento		Interno
<i>Euclidean</i> spp.	San Vicente y Las Granadinas	Comercial a pequeña escala	Líneas flotantes		Alimento		Interno
<i>Gracilaria</i> spp.		Comercial a pequeña escala	Líneas flotantes		Alimento		Interno
<i>Euclidean</i> spp.	Granada	Comercial a pequeña escala	Líneas flotantes		Alimento		Interno

Fuente: FAO. 2023. Estadísticas de pesca y acuicultura. Producción mundial de acuicultura 1950-2021. En: *FishStat*. Roma. [Consultado el 1 de marzo de 2024]. <https://www.fao.org/fishery/es/statistics/software/fishstatj>

El cultivo de macroalgas en estanques terrestres consiste en colocar en el fondo de ellos una fuente de aireación que permita a las macroalgas circular entre la superficie y el fondo, lo cual permite mantener en la columna de agua una biomasa mayor en crecimiento (Hanisak, 1987). Este método es empleado principalmente por empresas que producen macroalgas de alto valor comercial. En América Latina se ha experimentado con este sistema para cultivar *Gracilaria* spp. en estanques reciclando efluentes provenientes del cultivo de salmones ricos en nutrientes (Buschmann *et al.*, 1994). Otro avance para destacar es el cultivo de 95 toneladas anuales de *Ulva* sp., reportado en México, como fuente para alimento humano, utilizando sistemas de cultivo en biorreactores instalados en tierra (Cuadro 2; Zertuche-González *et al.*, 2021).

Cabe destacar que varios países producen pequeños volúmenes de macroalgas destinadas a mercados locales, mientras que otros han iniciado cultivos a escala experimental con el fin de diversificar la industria o reducir la presión de cosecha sobre las praderas naturales, sin alcanzar aún una escala a un nivel comercial (Cuadro 2). Al igual que en el contexto global (Naylor *et al.*, 2021), la producción en América Latina y el Caribe se concentra en un número limitado de especies (Cuadro 1 y Cuadro 2).

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS DE CULTIVO UTILIZADOS EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

La selección del sistema de cultivo para una especie de alga conlleva diversas implicaciones para optimizar las condiciones de cultivo. Sin embargo, es necesario reconocer tanto sus ventajas como sus desventajas para tomar decisiones adecuadas. Los sistemas de cultivo en estanques, por ejemplo, presentan un costo de infraestructura mayor y requieren personal técnico más especializado. No obstante, estos sistemas son más productivos: en el caso de *G. chilensis* se ha determinado que la productividad en sistemas de estanques puede alcanzar valores de casi 45 kg/m²/año (Buschmann *et al.*, 1994) significativamente superior a los sistemas de fondo tradicionalmente usados donde la productividad puede llegar a 12 kg/m²/año (Buschmann, Westermeier y Retamales, 1995). Los biorreactores optimizan la productividad al aprovechar la columna de agua, permitiendo mayor biomasa de siembra por unidad de área. Además, permiten regular la disponibilidad de nutrientes y CO₂, así como controlar la temperatura, salinidad y otros factores mediante el intercambio del agua (Hanisak, 1987; Buschmann *et al.*, 1994). Aun así, los sistemas de cultivo en estanques, dado su alto costo en infraestructura y operación, solo resultan comercialmente atractivos cuando se producen macroalgas de alto valor. Un ejemplo de éxito en América Latina es la producción de *Ulva* spp. para alimentación (Cuadro 2).

Los sistemas de fondo requieren de un sustrato somero, especialmente en aguas con alta transmitancia de luz. Estos cultivos se han desarrollado principalmente para *Eucheuma* y *Kappaphycus* en el Sureste de Asia y, en América, para *G. chilensis* en Chile. Su principal ventaja es el bajo nivel de inversión, ya que no requieren embarcaciones ni equipamiento especial para operar. Sin embargo, presentan limitaciones: el espacio puede estar restringido y presentar problemas de disponibilidad de luz o efectos negativos si en los sitios de cultivo, que son muy someros o intermareales, se producen marejadas que desprenden el alga. Estos inconvenientes pueden compensarse utilizando sistemas flotantes que mantienen a las macroalgas suspendidas y cercanas a la superficie del agua. Esta disposición mejora el acceso a la energía radiante del sol, permitiendo expandir el área apta para el cultivo hacia zonas más profundas. No obstante, esta solución implica mayores costos debido al sistema de anclaje y flotación, además de una operación más compleja que requiere embarcaciones, combustible y cuerdas de mayores dimensiones (Camus, Infante y Buschmann, 2019), lo que también resulta en un mayor impacto ambiental (Thomas *et al.*, 2024).

MIRANDO HACIA EL FUTURO DE LA ACUICULTURA DE MACROALGAS EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

Ciencia básica y avances en la tecnología del cultivo de macroalgas

Las macroalgas actualmente constituyen una porción significativa de la producción acuícola mundial (FAO, 2022). Si bien históricamente los países asiáticos han dominado la producción, los países occidentales están aumentando su participación con una visión más amplia. Esta no solo contempla ser una alternativa para la industria alimentaria, sino también un medio para mitigar impactos ambientales a través de servicios ecosistémicos (como biorremediación, reciclaje de nutrientes y producción de oxígeno; Eger *et al.*, 2023), además de buscar nuevos usos de valor agregado para la biomasa algal. Este enfoque ha impulsado el desarrollo de técnicas de cultivo modernas, tanto en la fase de *hatchery* como en cultivo en el mar, para avanzar hacia una industria responsable y sostenible. En particular, el foco ha estado puesto en el desarrollo de técnicas de cultivo que permitan maximizar la producción de manera sostenible con el medio ambiente y, al mismo tiempo, reducir los costos de operación en una región del mundo donde el costo de la mano de obra es elevado, en comparación con su contraparte asiática. Aunque estas mejoras en las técnicas de cultivo han tenido origen en países europeos, es necesario adaptarlas localmente a las características de las especies cultivadas en América Latina y el Caribe, para ofrecer soluciones acordes a la realidad de la región.

En la primera etapa de cultivo de macroalgas pardas, conocida como la fase de *hatchery*, se ha generalizado la técnica de producción de gametofitos (fase haploide de macroalgas pardas) que se mantienen por generaciones en condiciones de cultivo en estado no reproductivo (ver Zhang *et al.*, 2008). A partir de este desarrollo, se han propuesto técnicas de siembra directa que permiten adherir gametofitos sexualmente activados directamente al cabo utilizando “pegamentos” (Kerrison, Stanley y Hughes, 2018; pegamentos como AlgaeBinder de AtSeaNova), sin necesidad de mantenerlos en crecimiento en laboratorio o *hatchery*. Estos cabos sembrados pueden instalarse inmediatamente en los sistemas marinos, reduciendo significativamente el tiempo y los costos de cultivo en *hatchery*. Al mismo tiempo, empresas europeas han desarrollado nuevos sustratos, comercializando diferentes formatos de cabos, cintas y telas con propiedades particularmente diseñadas para el cultivo de macroalgas (ver productos de AtseaNova y Gore). Para la siembra de macroalgas rojas clonales, también se ofrece un sustrato 2D (AlgaeVeg; AtseaNova). La aplicación de estas innovaciones en cultivos de macroalgas en América Latina y el Caribe permitiría impulsar el desarrollo del cultivo de macroalgas pardas, una biomasa de creciente interés para la industria alimentaria (alginatos) y agroquímica (bioestimulantes de uso agronómico), entre otros.

El desarrollo de técnicas de producción y manejo de las fases tempranas en diferentes especies de algas ha permitido el surgimiento de compañías especializadas en proveer “semillas” a productores (ver Seaweed Solution www.seaweedsolution.com) y Hortimare (www.hortimare.com). Esto facilita la obtención de material de cultivo, promueve la diversidad genética y beneficia a aquellos productores que desean concentrar sus esfuerzos en el cultivo en marino exclusivamente, sin necesidad de invertir en infraestructura para la producción de semillas.

Para el cultivo en el mar se han desarrollado avances experimentales que demuestran la factibilidad de cultivar en mar abierto (*offshore*), lo que permite expandir la superficie de cultivo de macroalgas en áreas costeras con espacio limitado. Sin embargo, existen desafíos técnicos, ingenieriles y biológicos debido a las dificultades del sistema: fuertes corrientes, oleaje, bajas concentraciones de nutrientes, tráfico de grandes embarcaciones y enredos de los sistemas de cultivo con grandes mamíferos marinos (Verdegem *et al.*, 2023). En paralelo, se han logrado avances en la automatización de procesos como la siembra y la cosecha, mediante maquinaria adaptada a los diferentes sistemas de cultivo. Quedan pendientes estudios técnicos sobre el modelamiento de los factores que afectan

el cultivo de distintas especies de macroalgas en entornos reales (Meng y Chamecki, 2023), para optimizar el dimensionamiento de los sistemas de cultivos y su materialidad (como cabos, herrajes, boyas, fondeos, cadenas, entre otros).

América Latina y el Caribe cuenta con pocas especies cultivadas comercialmente, mientras que muchas especies en sistemas experimentales no logran alcanzar una escala comercial. Es urgente implementar nuevos desarrollos científicos y tecnológicos para diversificar, aumentar y mejorar la producción de macroalgas en la región.

Mercados para la acuicultura de macroalgas en América Latina y el Caribe

El cultivo de *G. chilensis* se ha mantenido en Chile principalmente debido a la presencia de una industria de procesamiento de agar que requiere biomasa de forma continua. Sin embargo, el valor de la biomasa ha decaído en los últimos 30 años, lo que ha afectado la producción de *G. chilensis*, reduciéndose de 120 000 toneladas anuales en la década de los 90 (Buschmann, Westermeier y Retamales, 1995) a menos del 25 % de esa producción (Camus, Hernández-González y Buschmann, 2019). Aunque existen estudios que proponen alternativas para dar mayor valor a esta alga roja (Brain-Isasi *et al.*, 2022), estos no establecen los requerimientos necesarios para su industrialización. Las macroalgas cosechadas (Cuadro 2) mantienen las rutas comerciales tradicionales (polisacáridos) en América Latina. Por lo tanto, parece necesario desarrollar nuevos modelos productivos tal, como demuestra la experiencia actual en el Brasil con el cultivo de *K. alvarezii* para el mercado de bioestimulantes en agronomía terrestre. Se requiere el desarrollo de nuevos productos y mercados para establecer en América Latina una industria económicamente sostenible que garantice beneficios económicos duraderos para los productores de macroalgas en localidades costeras de la región.

Desafíos ambientales para la acuicultura de macroalgas en América Latina y el Caribe

El desarrollo y la implementación de nuevas tecnologías para maximizar y optimizar la producción de macroalgas por cultivo presenta diversos desafíos para la industria. Desde el punto de vista ambiental, estudios recientes revelan múltiples beneficios, pero también señalan potenciales efectos ambientales negativos, que es necesario evaluar a medida que la industria se desarrolla.

Durante los últimos años, países productores de macroalgas como China han demostrado beneficios ambientales adicionales a la producción de biomasa. Por ejemplo, durante el periodo de crecimiento de macroalgas en cultivos a gran escala (miles de hectáreas), la calidad del agua mejora debido a la capacidad de estos productores primarios de remover nutrientes como nitrógeno y fósforo (Xie *et al.*, 2017). Esto tiene implicaciones en la transparencia del agua, la reducción de fitoplancton y la disminución de florecimientos de macroalgas nocivas (Yang *et al.*, 2015). Además, se ha demostrado que la extracción de CO₂ permite contrarrestar la acidificación de las aguas en zonas costeras (Xie *et al.*, 2017). Sin embargo, se requieren estudios a gran escala que evalúen y demuestren estos potenciales efectos benéficos, ya que extrapolar resultados a partir de pequeños experimentos podría sugerir el uso de los cultivos de macroalgas para propósitos no probados como el secuestro de carbono que podrían tener implicaciones éticas (Troell *et al.*, 2023; Chopin *et al.*, 2024).

Desde el punto de vista de los impactos ambientales negativos que pueden emerger del cultivo de macroalgas, se destacan tres aspectos principales relacionados con las prácticas y sistemas de cultivo implementados.

- i) La ocurrencia de enfermedades y pestes en cultivos de macroalgas. La proliferación de bacterias, virus, hongos, invertebrados u otras macroalgas epifitas puede diezmar la población algal en un período de tiempo muy corto (días). Si bien esto no justifica el uso indiscriminado de pesticidas, se requieren estudios para comprender su manejo y establecer regulaciones estrictas. Un

ejemplo histórico en el sur de Chile fue el uso de pesticidas para el control de poliquetos herbívoros en cultivos de *G. chilensis*. Para prevenir situaciones similares, los países de la región deben establecer normas y regulaciones específicas.

- ii) La cosecha de grandes volúmenes de biomasa genera residuos en el ambiente. Las macroalgas exudan materia orgánica (como polisacáridos) y pierden biomasa por desprendimiento de parte de los talos. Las grandes macroalgas pardas pueden exudar hasta un 25 % de la productividad primaria (Hurd *et al.*, 2022). Para evaluar los potenciales impactos de una acuicultura a gran escala, es importante conocer la ruta de esta materia orgánica, sus efectos sobre la calidad de la columna de agua, el impacto en redes tróficas y las consecuencias de su acumulación.
- iii) Los aspectos de bioseguridad en los diferentes sistemas de producción. La introducción de macroalgas ha generado efectos significativos en ecosistemas costeros globales, incluyendo América Latina (*Undaria pinnatifida* en Argentina; Raffo, Dellatorre y Ciancia, 2022), llegando incluso a casos de introducción ilegal (Camus *et al.*, 2022.) Por ello, son necesarias regulaciones en el traslado de macroalgas para prevenir invasiones y el transporte de otros organismos asociados, tales como enfermedades (Cottier-Cook *et al.*, 2022; Mendez *et al.* 2024).

CONCLUSIONES

El desarrollo del cultivo de macroalgas es todavía incipiente en América Latina y el Caribe, aunque se observa un claro aumento de actividades productivas en diferentes países de la región. Destacan los cultivos que están abriendo nuevos mercados, como el cultivo en estanques de *Ulva* en México y de *K. alvarezii* en el Brasil para la producción de bioestimulantes de uso agronómico. Es también claro que el desarrollo de la acuicultura de macroalgas en América Latina y el Caribe está basado en especies clonales que, al reproducirse por fragmentación de talos, no requieren de tecnologías sofisticadas. Sin embargo, el cultivo de especies con ciclos de vida más complejos y su escalamiento demandará un desarrollo con un enfoque más industrial. Por ello, es necesaria una mayor inversión en investigación básica y tecnológica, así como el desarrollo de mercados que brinden mayor estabilidad a la producción de macroalgas en la región. Esto debe ir acompañado de un marco institucional en los países productores que establezca regulaciones efectivas para prevenir riesgos ambientales.

REFERENCIAS

- Alveal, K., Romo, H., Werlinger, C. y Oliveira, E. 1997. Mass cultivation of the agar-producing alga *Gracilaria chilensis* (Rhodophyta) from spores. *Aquaculture*, 148: 77–83. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(96\)01415-9](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(96)01415-9)
- Ask, E., Batibasaga, A., Zertuche-González, J.A., y de San, M. 2003. Three decades of *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta). Introduction to non-endemic locations. En: *Proceedings of the 17th International Seaweed Symposium*. Cape Town, South Africa, pp 49–57.
- Brain-Isasi, S., Correa, S., Amado-Hinojosa, J., Buschmann, A.H., Camus, C. y Lienqueo, M.E. 2022. Combined extraction methodology for simultaneous recovery of phycobiliproteins and agar from the red alga *Gracilaria chilensis* C.J. Bird, McLachlan y E.C. Oliveira. *Algal Research*, 67: 102821. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102821>
- Buschmann, A.H., Mora, O., Gómez, P., Böttger, M., Buitano, S., Retamales, C.A., Vergara, P.A. y Gutierrez, A. 1994. *Gracilaria chilensis* outdoor tank cultivation in Chile: use of land-based salmon culture effluents. *Aquacultural Engineering*, 13: 283–300. [https://doi.org/10.1016/0144-8609\(94\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0144-8609(94)90016-7)

- Buschmann, A.H., Westermeier, R. y Retamales, C. 1995. Cultivation of *Gracilaria* in the sea-bottom in southern Chile: a review. *Journal Applied Phycology*, 7: 291–301. <https://doi.org/10.1007/BF00004003>
- Camus, C., Hernández-González, M.C. y Buschmann, A.H. 2019. The seaweed resources of Chile over the period 2006–2016: moving from gatherers to cultivators. *Botánica Marina*, 62: 237–247. <https://doi.org/10.1515/bot-2018-0030>
- Camus, C., Infante, J. y Buschmann, A.H. 2019. Revisiting the economic profitability of giant kelp *Macrocystis pyrifera* (Ochrophyta) cultivation in Chile. *Aquaculture*, 502: 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.12.030>
- Camus, C., Leal, P.P., Faugeron, S., Henríquez-Antipa, I.A., Fernández, P., Cook, S., Cárcamo, P.F. y Buschmann, A.H. 2022. First report of the intentionally introduced kelp, *Saccharina japonica*, in the Pacific coast of southern Chile. *Algal Research*, 65: 102750. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102750>
- Chopin, T., Costa-Pierce, B.A., Troell, M., Hurd, C.L., Costello, M.J., Backman, S. y Buschmann, A.H., et al. 2024. Deep-ocean seaweed dumping for carbon sequestration: Questionable, risky, and not the best use of valuable biomass, *One Earth*, 7(3): 359–364. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.01.013>
- Cottier-Cook, E.J., Cabarubias, J.P., Brakel, J., Brodie, J., Buschmann, A.H., Campbell, I. y Critchley, A.T., et al. 2022. A New Progressive Management Pathway for Improving Seaweed Biosecurity. *Nature Communications*, 13: 7401. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34783-8>
- Eger, A.M., Marzinelli, E.M., Beas-Luna, R., Blain, C.O., Blamey, L.K., Bytnrsd, J.E. y Carnell, P.E., et al. 2023. The value of ecosystem services in global marine kelp forest. *Nature Communications*, 14: 1894. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37385-0>
- FAO. 2022. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022. *Hacia la transformación azul*. Roma, FAO. <https://doi.org/10.460/cc0461es>
- FAO. 2023. Estadísticas de pesca y acuicultura. Producción mundial de acuicultura 1950–2021. En: *FishStat*. Roma. [Consultado el 1 de marzo de 2024]. <https://www.fao.org/fishery/es/statistics/software/fishstatj>
- Halling, C., Aroca, G., Cifuentes, M., Buschmann, A.H. y Troell, M. 2005. Comparison of suspended cultivation methods of *Gracilaria chilensis* in an integrated seaweed and fish cage culture. *Aquaculture International*, 13: 409–422. <https://doi.org/10.1007/s10499-005-6977-x>
- Hanisak, D.M. 1987. Cultivation of *Gracilaria* and other macroalgae in Florida for energy production. En: *Seaweed Cultivation for Renewable Resources* (K.T. Bird & P.H. Benson, eds.). Elsevier, Amsterdam, pp. 191–218.
- Hayashi, L., Bulboa, C., Kradolfer, P., Soriano, G. y Robledo, D. 2014. Cultivation of red seaweeds: a Latin American perspective. *Journal Applied Phycology*, 26: 719–727. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0143-z>
- Hurd, C.L., Law, C.S., Bach, L.T., Britton, D., Hovenden, M., Paine, E.R., Raven, J.A., Tamsitt, V. y Boyd, P.W. 2022. Forensic carbon accounting: Assessing the role of seaweeds for carbon sequestration. *Journal of Phycology*, 58: 347–363. <https://doi.org/10.1111/jpy.13249>
- Kerrison, P.D., Stanley, M.S. y Hughes, A.D. 2018. Textile substrate seedling of *Saccharina latissima* sporophytes using a binder: an effective method for the aquaculture of kelp. *Algal Research*, 33: 352–357. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.06.005>
- Littler, M. M. y Littler, D.S. 1980. The evolution of thallus form and survival strategies in benthic marine macroalgae: field and laboratory tests of a functional form model. *American Naturalist*, 116: 25–44. <https://doi.org/10.1086/283610>
- Mendez, C., Bustamante, D.E., Calderon, M.S., Gauna, C., Hayashi, L., Robledo, D., Tapia-Larios, C., Campbell, I., Westermeier, R. y Murúa, P. 2024. Biosecurity baseline for a sustainable development of seaweed aquaculture in Latin America. *Marine Policy*, 159: 105933. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105933>

- Meng, J.F. y Chamecki, M. 2023. Wave-induced motion and drag reduction of kelp. *ESS Open Archive*. November 08, 2023. <https://doi.org/10.22541/essoar.169945282.23163388/v1> [Consultado el 6 de marzo de 2025].
- Naylor, R.L., Hardy, R.W., Buschmann, A.H., Bush, S.R., Cao, L., Klinger, D.H., Little, D.C., Lubchenco, J., Shumway, S.E. y Troell, M. 2021. A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature*, 591: 551–563. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03308-6>
- Raffo, M.P., Dellatorre, F. y Ciancia, M. 2022. Seaweed resources of Argentina (SW Atlantic): production, bio-ecological, applied research and challenges for sustainable development. *Applied Phycology*, 3:383–421. <https://doi.org/10.1080/26388081.2022.2076260>
- Santelices, B. 1996. Seaweed research and utilization in Chile: moving into a new phase. *Hydrobiologia*, 326/327: 1–14. <https://doi.org/10.1007/bf00047781>
- Santelices, B. 1999. A conceptual framework for marine agronomy. *Hydrobiologia*, 398/399: 15–23. <https://doi.org/10.1023/A:1017053413126>
- Thomas, J.-B.E., Ahlgren, E., Hornborg, S. y Ziegler, F. 2024. Life cycle environmental impacts of kelp aquaculture through harmonized recalculation of inventory data. *Journal of Cleaner Production*, 450: 141987. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141987>
- Troell, M., Henriksson, P.J.G., Buschmann, A.H., Chopin, T. y Quahe, S. 2023. Farming the ocean – Seaweeds as a quick fix for the climate? *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 31(3): 285–295. <https://doi.org/10.1080/23308249.2022.2048792>
- Vázquez-Delfin, E., Freile-Pelegrín, Y., Pliego-Cortes, H. y Robledo, D. 2019. Seaweed resources of Mexico: current knowledge and future perspectives. *Botánica Marina*, 62(3): 275–289. <https://doi.org/10.1515/bot-2018-0070>
- Verdegem, M., Buschmann, A.H., Latt, U.W., Dalsgaard, A.J.T. y Lovatelli, A. 2023. The contribution of aquaculture systems to global aquaculture production. *Journal World Aquaculture Society*, 54: 206–250. <https://doi.org/10.1111/jwas.12963>
- Westermeier, R., Gómez, I. y Rivera, P. 1993. Suspended farming of *Gracilaria chilensis* (Rhodophyta, Gigartinales) at Cariquilda River, Maullin, Chile. *Aquaculture*, 113: 215–229. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(93\)90475-E](https://doi.org/10.1016/0044-8486(93)90475-E)
- Yang, Y., Chai, Z., Wang, Q., Chen, W., He, Z. y Jiang, S. 2015. Cultivation of seaweed *Gracilaria* in Chinese coastal waters and its contribution to environmental improvements. *Algal Research*, 9: 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.03.017>
- Xie, X., He, Z., Hu, X., Yin, H. Liu, X. y Yang, Y. 2017. Large-scale seaweed cultivation diverges water and sediment microbial communities and sediment microbial communities in the coast of Nan’ao Island, South China Sea. *Science of the Total Environment*, 598: 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.233>
- Zertuche-González, J.A., Sandoval-Gil, J.M. Rengel-Mendoza, L.K. Gálvez-Palazuelos, A.I. Guzmán-Calderón, J.M. y Yarish, C. 2021. Seasonal and interannual production of sea lettuce (*Ulva* sp.) in outdoor cultures based on commercial size ponds. *Journal World Aquaculture Society*, 52: 1047–1058. <https://doi.org/10.1111/jwas.12773>
- Zhang, Q.S., Qu, S.C., Cong, Y.Z., Luo, S.J. y Tang, X.X. 2008. High throughput culture and gametogenesis induction of *Laminaria japonica* gametophyte clones. *Journal of Applied Phycology*, 20: 205–211. <https://doi.org/10.1007/s10811-007-9220-5>

Perspectiva territorial y social del cultivo de macroalgas de pequeña escala en América Latina

Marcela Avila¹ y Cecilia Godoy²

¹ Universidad Santo Tomás, Puerto Montt, Chile

² Fundación Bordemar, Puerto Varas, Chile

Avila, M. y Godoy, C. 2025. *Perspectiva territorial y social del cultivo de macroalgas de pequeña escala en América Latina*. En: Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Murúa Andrade, P. y Farías Molina, A. (coords.). Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 24-26 de junio de 2024, Puerto Varas, Chile. *FAO Actas de Pesca y Acuicultura*. N.º 74. Roma, FAO. pp. 93-121.

RESUMEN

La acuicultura de macroalgas ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos 50 años y, en la actualidad, representa el 96 % de la demanda mundial. Sin embargo, América Latina aporta solo el 1,2 %, y el 96 % de su producción proviene de praderas naturales. Dentro de la región, Chile lidera con un 95 % de la producción, seguido del Brasil, México, el Perú y el Ecuador, donde esta actividad se desarrolla principalmente en comunidades costeras bajo un modelo de trabajo colaborativo y familiar. La expansión de la acuicultura comercial en muchos países en desarrollo ha sido un arma de doble filo. Por un lado, ha contribuido a reducir la brecha de género en la participación en el mercado laboral; por otro, ha generado empleos con altas exigencias en tiempo y mano de obra. En general, se han documentado casos de discriminación de género, acuerdos laborales informales y bajos niveles de remuneración, además de un acceso limitado o inexistente a programas de protección social. Dadas las particularidades ambientales, geográficas, sociales, culturales y económicas de la región, el uso, cultivo y producción de macroalgas en comunidades costeras ha tenido un desarrollo desigual. En esta revisión, analizamos la situación de América Latina a partir del trabajo de investigadores y profesionales del sector, así como de publicaciones en revistas especializadas y bases de datos internacionales. Los resultados evidencian una importante brecha de información, especialmente en lo que respecta a la diferenciación por actividad y género.

INTRODUCCIÓN

En 2020, la producción pesquera mundial alcanzó un récord de 122,6 millones de toneladas, impulsado especialmente por el incremento acuícola. De esta cifra, 37,8 millones de toneladas correspondieron a la producción de algas, con un valor estimado de 16 500 millones de USD. Se estima que 58,5 millones de personas a nivel mundial participaron en el sector pesquero acuícola, de las cuales alrededor del 35 % trabajaba en la acuicultura, a tiempo completo o parcial. Más de la mitad de estos trabajadores eran mujeres, quienes desempeñaban un papel fundamental en las etapas de postcaptura (FAO, 2022a), además de asumir las responsabilidades del hogar y el cuidado familiar. Sin embargo, su participación en el sector se da, en su mayoría, en condiciones de informalidad, con los salarios más bajos y menos estables, ocupando

los puestos de menor cualificación dentro de la cadena de valor. Además, se enfrentan a importantes barreras de género, que les impiden explorar plenamente sus funciones en el sector y beneficiarse de ellas (FAO, *op. cit.*).

Actualmente, no existen datos estandarizados a nivel regional disponibles y que estén desglosados por actividad y por género, lo que dificulta visibilizar la contribución de la mujer en la acuicultura y evaluar su impacto en las comunidades. Sin embargo, la FAO (2016) recopiló estadísticas de empleo en el sector pesquero desde 1950 señalando que, en los 61 países con datos desglosados por género, la participación de la mujer en actividades pesqueras se daba una proporción de 1 por cada 7,3 hombres (Sánchez-Roncancio y Puentes, 2024; OIT, 2021a).

El creciente interés por los productos derivados de macroalgas se debe a diversos factores, como la búsqueda de nuevas soluciones terapéuticas, la resistencia a antibióticos o plaguicidas y la necesidad de nuevos productos en las industrias farmacéutica, cosmética y alimentaria. Este aumento de la demanda hará necesaria una mayor mano de obra en la producción, que, previsiblemente procederá de actividades de cultivo. No obstante, la falta de estudios químicos y biológicos completos sobre muchas especies de macroalgas, especialmente aquellas en peligro de extinción, podría suponer la pérdida irreversible de compuestos con alto valor farmacéutico (Mohamed, Hashim y Rahman, 2012; Andrade *et al.*, 2013; McChesney, Sylesh y Venkataraman, 2007). Por esta razón, la investigación en productos derivados de macroalgas representa un enorme potencial para el descubrimiento de nuevos compuestos con aplicaciones industriales (Colgate y Molyneux, 2008; Peng *et al.*, 2015).

Es innegable el rol de las algas en la adaptación al cambio climático de zonas marino costeras. Estas contribuyen a amortiguar la energía de las olas, protegen el borde costero, regulando el pH y aportando oxígeno al agua, lo que ayuda a reducir localmente los efectos de la acidificación y la desoxigenación, y además actúan como fuentes de secuestro de carbono (Espí-Alemañ, Robledo y Hayashi, 2019; Marquet, 2022). Todos estos factores son argumentos clave para el desarrollo de la acuicultura de algas, ya que permitirán disminuir la presión sobre las praderas naturales y fomentar la diversificación productiva de las comunidades locales.

América Latina, por tanto, cuenta con un gran potencial en la acuicultura de algas a nivel mundial. La región posee una extensa zona geográfica con una superficie terrestre de 21 millones de km² y una costa de 59 591 km, oscila entre 30°N y 55°S, abarcando cuatro dominios oceánicos: Pacífico norte templado, Pacífico oriental tropical, América del Sur templada y Atlántico tropical (Wurmann, 2017). Además, cuenta con una superficie marina de 16 millones de km² y, para 22 países de la región, el océano representa un 60 % o más de sus territorios soberanos (Tambutti y Gómez, 2022). En esta vasta extensión geográfica confluyen varios tipos de ecosistemas marino costeros que albergan una gran diversidad de especies de algas. Como indicador de su rica biodiversidad, América Latina reúne 47 de las 258 ecorregiones marinas del mundo con alta biodiversidad, más que cualquier otra región (Tambutti y Gómez, *op. cit.*).

Por otro lado, alrededor de 2,3 millones de personas participan de forma directa o indirecta en las actividades pesqueras en América Latina, y un 27 % de la población de la región reside en zonas costeras. A nivel mundial, las mujeres representan el 14 % de la fuerza laboral en el sector de la pesca y la acuicultura, y en esta última actividad alcanzan el 16 % (OIT, 2021a). Su labor se concentra principalmente en actividades conexas o complementarias, como la reparación de redes, la selección y el lavado de pescado, así como su preparación y venta. Estas actividades esenciales, pero menos visibles, rara vez se registran en las estadísticas oficiales. Como consecuencia, las políticas y programas de desarrollo suelen ignorar las necesidades de las mujeres, perpetuando su invisibilidad en el sector.

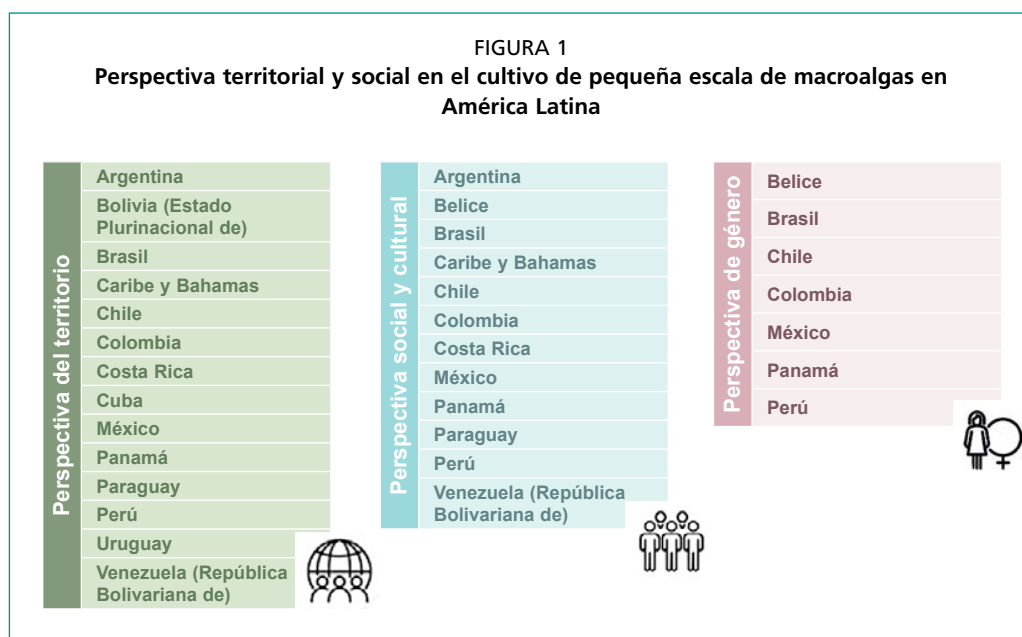
La falta de datos fidedignos sobre la cadena de suministro de la acuicultura a nivel mundial y, más aún en América Latina, supone un desafío. Esto se debe, en parte, a que

en las fases posteriores de la cadena de suministro, es decir, en actividades fundamentales como la transformación y el comercio mayorista, la acuicultura y la pesca de captura se consideran conjuntamente, aunque ambas pueden diferir totalmente en términos de exposición a los precios del mercado, repercusiones ambientales y mecanismos de gobernanza. Además, la alta informalidad de la producción acuícola a pequeña escala en muchos países en desarrollo dificulta aún más la obtención de información precisa y actualizada (OIT, 2021b).

La biomasa algal usada como alimento o en la industria en América Latina proviene principalmente de praderas naturales (96 %), mientras que solo una pequeña proporción (4 %) procede de cultivos (Espí-Alemañ, Robledo y Hayashi, 2019). El desarrollo de la acuicultura de algas ha sido aún incipiente en la región, con una producción derivada del cultivo a pequeña escala y comercial en Chile y el Brasil (Hayashi *et al.*, 2014; Espí-Alemañ, Robledo y Hayashi, 2019). También se registran volúmenes en menor escala en la Argentina, Belice, Costa Rica, el Ecuador, México, Panamá, el Perú y la República Bolivariana de Venezuela, los cuales corresponden a resultados de proyectos o de actividades privadas con especies locales o introducidas.

En la actualidad existe la urgente necesidad de establecer normativas que valoren y protejan los ecosistemas y sus servicios esenciales, además de fortalecer buenas prácticas en el cultivo sostenible de macroalgas. Esto garantizará beneficios e innovaciones para las comunidades marinas costeras (Rebours *et al.*, 2014), que han sido usuarias ancestrales de las algas, para fines alimentarios y medicinales. Asimismo, la zonificación y la planificación de la acuicultura, tanto marina como continental, se han convertido en instrumentos clave para la gestión sectorial. Su aplicación es fundamental para el desarrollo territorial y para fomentar el potencial de la acuicultura de pequeña escala de manera armoniosa y sostenible, en consonancia con los nuevos escenarios climáticos (CEPAL, 2019; Comité Científico Asesor de Cambio Climático, 2021; FAO, 2021; Wurmman, Soto y Norambuena, 2022).

El presente trabajo se ha desarrollado a partir de información recopilada de fuentes primarias, incluyendo profesionales de instituciones públicas, empresarios e investigadores del sector pesquero acuícola de distintos países de América Latina. Asimismo, se han revisado publicaciones en revistas indexadas e informes de proyectos realizados por entidades públicas o agencias internacionales en la región, con un enfoque territorial, social, cultural y de género (Figura 1).



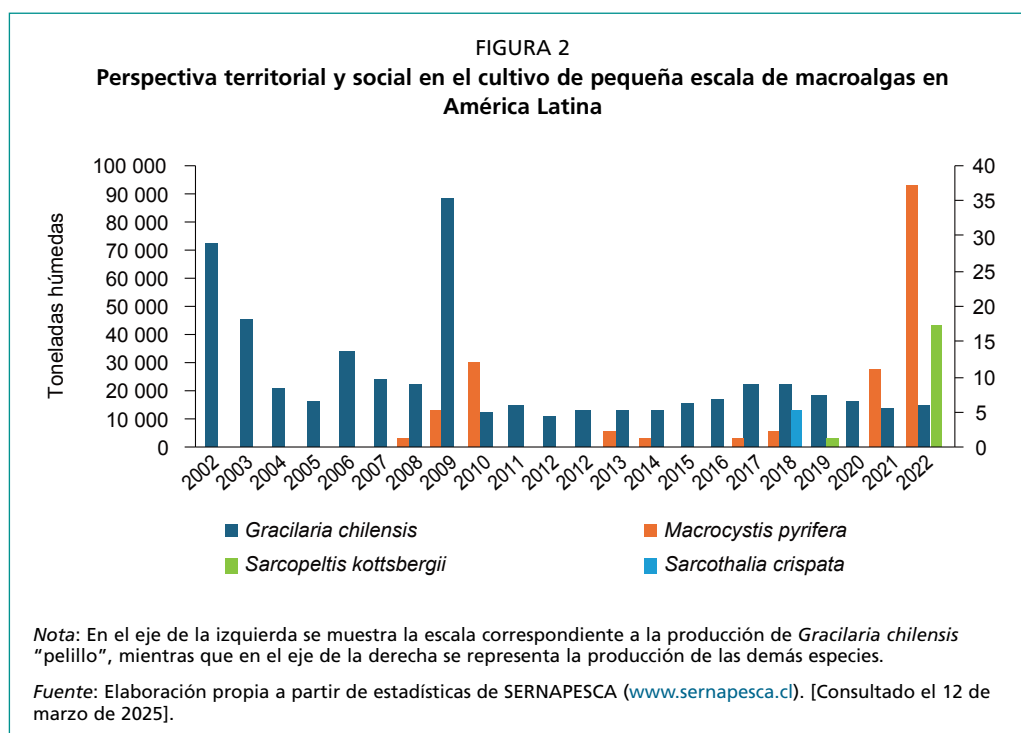
PERSPECTIVA TERRITORIAL (GEOGRÁFICA) EN AMÉRICA LATINA PARA EL CULTIVO DE ALGAS

América Latina posee una biodiversidad única en algas, y en la mayoría de los países, su explotación comenzó a partir de praderas naturales, una situación que apenas ha cambiado con el tiempo. En este apartado, se presenta un recorrido por América Latina, entendiendo el territorio como la porción de superficie terrestre y marina que pertenece a un país o está vinculada a él. Las experiencias en el cultivo de algas en la región, que se resumen a continuación, reflejan el impacto de diversos factores locales que van más allá de las características geográficas.

En **la Argentina**, durante la década de 1990, la empresa Soriano S.A. instaló un centro de cultivo para *Gracilaria* sp. en la Patagonia, pero las duras condiciones oceanográficas y el intenso epifitismo no permitieron el desarrollo de este proyecto (Espí-Alemañ, Robledo y Hayashi, 2019). Más recientemente, en 2020, surgió el proyecto Patagonia Azul, situado en la costa de Chubut, con base en Camarones, una pequeña comunidad costera del mar patagónico. La Fundación Rewilding está trabajando en la viabilidad de desarrollar granjas marinas regenerativas, centradas en el cultivo de “cachiyuyo” (*Macrocystis pyrifera*), la principal especie formadora de bosques submarinos del mundo. Además, se espera experimentar con el cultivo de “lechuga de mar” (*Ulva lactuca*) y “pelillo” (*Gracilaria gracilis*).

En **el Brasil**, los cultivos de macroalgas comenzaron en 1995 con la introducción de la especie *Kappaphycus alvarezii* en el norte de la costa de Sao Paulo (Hayashi *et al.*, 2014). Años más tarde, el cultivo comercial de esta especie fue autorizado por el Instituto Brasileiro de Medio Ambiente y Recursos Naturales (IBAMA) a través de la normativa IBAMA N°1 del 21 de enero de 2020, permitiendo su producción en el Estado de Santa Catarina, desde el municipio de Itapoá hasta Jaguaruna. Para impulsar la actividad, se llevaron a cabo cursos de capacitación para acuicultores, y entre 2021–2022 se registró una producción de 102 toneladas húmedas, con cuatro centros en operación. En 2023, la producción aumentó a 300 toneladas húmedas (Santos y Hayashi, 2022). El Brasil es el único país de América Latina donde los cultivos comerciales de *K. alvarezii* y *Eucheuma striatus* han tenido éxito (Espí-Alemañ, Robledo y Hayashi, 2019). Además, se han registrado cerca de 10 granjas experimentales que operan en Isla Grande y la Bahía de Sepetiba, donde también opera una pequeña planta de carrageninas (Hayashi *et al.*, 2014). A pesar de la gran diversidad de especies presentes en la costa brasileña, comercialmente solo se explotan *Hypnea* y *Gracilaria* (Marinho-Soriano *et al.*, 2006). La falta de regulación ha provocado la sobreexplotación de praderas naturales y el empobrecimiento de las comunidades costeras del norte del país. Para abordar esta problemática, en 2001 el Gobierno brasileño puso en marcha un proyecto con la FAO para fomentar el cultivo sostenible de algas, beneficiando a comunidades costeras del noreste, especialmente en los Estados de Rio Grande do Norte, Paraíba y Ceará. El Brasil es, probablemente, el único país en América Latina que cuenta con una legislación específica para el cultivo de algas, en particular para la producción comercial de *K. alvarezii*. Sin embargo, la normativa restringe su cultivo comercial de la especie entre el norte del Estado de Sao Paulo y el sur de la costa de Rio de Janeiro, lo que obliga a muchos productores a operar de manera informal.

En **Chile**, durante el año 2022 se extrajeron alrededor de 479 597 toneladas de macroalgas, abarcando 14 especies con valor comercial. De este total, destacan el huiro negro (*Lessonia berteroana/Lessonia spicata*) con un 48 % de la producción, el pelillo (*Gracilaria chilensis*) con un 11 %, y el huiro palo (*Lessonia trabeculata*) con un 17,2 %. La extracción de macroalgas se lleva a cabo a lo largo de toda la costa del país.



La acuicultura en Chile está dominada por la salmonicultura y la mitilicultura, mientras que el cultivo de pectinidos y macroalgas tiene un papel menor. La expansión de la acuicultura en el país ha estado impulsada por estrategias de desarrollo orientadas a la exportación, concentrándose principalmente en la zona sur (Naylor *et al.*, 2021). La acuicultura de algas se inició en la década de 1980 y, para el año 2022, la producción alcanzó 13 417 toneladas, con dos recursos: pelillo (99 %) y huiro (0,1 %). Se considera una alternativa de desarrollo con potencial para diversificar el sector pesquero artesanal, mejorar la economía costera local y reducir la presión sobre las praderas naturales. Sin embargo, la producción de los centros de cultivo de algas ha experimentado fluctuaciones a lo largo del tiempo (Figura 2).

Numerosas iniciativas de cultivo han sido desarrolladas para varias especies, por universidades e institutos de investigación locales, principalmente a escala experimental y piloto, en el marco de proyectos de investigación (Cuadro 1). Hasta la fecha, el cultivo de macroalgas está representado casi exclusivamente por pelillo (*G. chilensis*) (Figura 3a y Figura 3b). Se trata de una actividad estacional que requiere una mayor intensidad de trabajo en la época estival, desde octubre hasta mayo. El cultivo de esta especie ha experimentado modificaciones en el tiempo y las técnicas de cultivo han sido difundidas mediante manuales, en capacitaciones y videos. Asimismo, se han generado documentos con recomendaciones prácticas aplicables a pequeña escala, con el objetivo de garantizar un sistema acuícola sostenible y competitivo (Avila *et al.*, 2019; Saavedra *et al.*, 2019). También se han publicado manuales para el cultivo de otras especies de macroalgas de importancia económica (Avila *et al.*, 2017; 2018; Westermeier *et al.*, 2005). Además, entre 2008 y 2022 se han registrado producciones esporádicas de luga roja (*Sarcopeltis skottsbergii*), luga negra (*Sarcothalia crispata*) y huiro (*M. pyrifera*) (Figura 3).

Para fomentar esta actividad, el Estado de Chile promulgó en 2016 la Ley 20.925 de Bonificación para el Cultivo y Repoblamiento de Algas (Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, 2016). Su objetivo es aumentar la biomasa disponible de los recursos algales con importancia ecológica y económica, mediante un sistema de bonificación dirigido a pescadores artesanales y empresas pequeñas.

La acuicultura de pequeña escala es un sector que mantiene su carácter artesanal, con un 96 % de cultivos de tipo extensivo y un 88 % mono productor (FIP, 2006).



En cuanto a la comercialización, un 63 % de los productores vende a intermediarios, el 20 % a unidades de transformación (plantas y salas de proceso), el 8 % a granel y otro 8 % a procesos de continuidad de producción (FIPA, 2019). Si bien la expansión de la acuicultura puede parecer prometedora, también plantea retos en términos de sostenibilidad. Existen preocupaciones relacionadas con las implicaciones en las relaciones de género y las dinámicas intracomunitarias, la gobernanza y el poder de mercado, la distribución de los beneficios y el impacto ambiental de la producción en los ecosistemas locales (Gallardo-Fernández *et al.*, 2024).

El conjunto de países que conforma el **Caribe** y **las Bahamas** (Antigua y Barbuda, las Bahamas, Barbados, Cuba, Dominica, Granada, Haití, Jamaica, la República Dominicana, Saint Kitts y Nevis, Santa Lucía, San Vicente y las Granadinas, Trinidad y Tobago) es, posiblemente, el más vulnerable de la región y está expuesto a fenómenos hidrometeorológicos cada vez más intensos debido al cambio climático. Estos territorios forman un continuo geográfico que se extiende desde Trinidad y Tobago hasta el archipiélago cubano. La mayoría de los estados caribeños, especialmente los insulares, cuentan con dimensiones territoriales reducidas, lo que limita la disponibilidad de recursos naturales, que suelen ser sobreexplotados por una población en crecimiento. Esto los hace aún más vulnerables a los cambios en la economía mundial. Actualmente, el principal motor de las economías caribeñas es el sector servicios, que abarca el turismo, los servicios financieros, el comercio mayorista y minorista, el transporte y la construcción, representando más del 50 % del Producto Interno Bruto (PIB) en comparación con otros sectores. A pesar de compartir una ubicación geográfica

similar, los países del Caribe presentan grandes diferencias en sus niveles de desarrollo y bienestar. Mientras que en Antigua y Barbuda, Barbados y las Bahamas la pobreza afecta a menos del 15 % de la población, en Haití y Suriname esta cifra supera el 75 %. Este fenómeno es especialmente pronunciado en zonas rurales. En este territorio, hasta la fecha, no existen registros publicados sobre experiencias de cultivo de algas.

En el caso de **Cuba**, las primeras investigaciones sobre el uso de las macroalgas se centraron en la obtención de ficocoloides (alginatos, agar y carragenanos), abonos y suplementos alimenticios para la producción pecuaria (Suárez, Martines-Danaras y Alfonso, 2015). A partir de la década de 1980, el interés por este recurso marino se orientó hacia la evaluación de su potencial químico-farmacológico (Nuñez *et al.*, 2006), así como para su aplicación en la agricultura como fertilizantes, bioestimulantes, acondicionadores de suelo y en la protección de los cultivos (Espinosa-Antón, Hernández-Herrera y González, 2021; Suarez, Martines-Danaras y Alfonso, *op. cit.*).

Desde el norte de América del Sur, **en el Caribe colombiano**, se han identificado cerca de 600 especies de algas, lo que representan aproximadamente un 45 % del total registrado en el Atlántico occidental tropical y subtropical (Bula-Meyer y Norris, 2001; Díaz-Pulido y Garzón-Ferreira, 2002; Rozo, 2019). Además del intenso esfuerzo de investigación local, las particularidades ambientales y geográficas del Caribe colombiano, incluyendo la surgencia estacional en los departamentos del Magdalena y La Guajira, así como la larga historia geológica de la región, son posiblemente los factores determinantes para que exista tan alta diversidad de algas (Díaz-Pulido, 2000). Sin embargo, en contraste con los numerosos estudios sobre taxonomía y distribución geográfica del recurso algal en Colombia (Díaz-Pulido y Díaz-Ruiz, 2003), las investigaciones sobre el uso y valor nutricional o industrial de las algas rojas son muy escasos. En cuanto a la acuicultura, según el diagnóstico de la Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP) y la FAO, en 2013 solo se reportaba la superficie total dedicada a la piscicultura en Colombia, que alcanzaba las 2 130 hectáreas de espejo de agua. Para 2014, la producción se incrementó a 89 140 toneladas, manteniendo la proporción de especies cultivadas. La gran mayoría de las granjas acuícolas (98,67 %) utiliza estanques en tierra, mientras que el 1,33 % restante emplea sistemas de jaulas flotantes en distintos cuerpos de agua. No obstante, en estos registros oficiales no aparecen datos sobre el cultivo de las algas (Godoy *et al.*, 2016).

En **Costa Rica**, desde hace más de dos décadas se han considerado proyectos para el desarrollo del cultivo de macroalgas. Estas iniciativas han permitido identificar especies viables para su cultivo en el marco de estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático, ampliando el modelo de la agricultura acuática (Radulovich, 2008; Radulovich, Umanzor y Cabrera, 2013).

En **México**, el cultivo de algas es una actividad reciente, desarrollada principalmente en el noroeste templado del país, donde se han utilizado especies nativas de *Ulva* en instalaciones en tierra, con resultados prometedores a escala comercial. En el Golfo de México tropical, aunque aún no existe una producción comercial, hay un creciente interés en el desarrollo del “espagueti de mar”, debido a las condiciones ambientales favorables en la región de Yucatán. Asimismo, han surgido iniciativas privadas para el cultivo de algas. En 2020, la empresa AlgaMar, obtuvo un permiso de acuicultura para el cultivo de *M. pyrifera* y *Ecklonia arborea*. Recientemente, la empresa ha instalado cultivos de *M. pyrifera* (conocida como *kelp* gigante del Pacífico) en Baja California con fines comerciales (R. Marcos, comunicación personal, 2024). En 2023, cosechó 69 toneladas frescas de *Macrocystis*. La granja, ubicada en la Bahía Salsipuedes, en el norte del país, destina toda su producción a la fabricación de extracto de algas para agricultura.

La viabilidad del cultivo de especies de algas nativas e introducidas en México ha sido objeto de estudio, y las investigaciones concluyen que su desarrollo solo será posible mediante el interés y la inversión del sector industrial, de inversionistas locales y del respaldo de las autoridades estatales (Zertuche-González, 1993; Godínez-Ortega, 2008). En términos generales, los datos indican que el cultivo de algas en México ha estado limitado a ciertas zonas del país.

En **Panamá**, desde el año 2000 existen cultivos comerciales de macroalgas, con especies de los géneros *Gracilaria*, *Eucheuma* y *Kappaphycus*. Desde 2004, esta actividad se ha desarrollado con fines comerciales en la zona costera del Caribe panameño, al noreste del Canal de Panamá. Estos cultivos fueron desarrollados como iniciativas privadas en dos fases: el cultivo *in situ* (en el mar y en tanques) y el cultivo *in vitro* (en laboratorio, con aclimatación en tanques y acuarios). El objetivo ha sido obtener un desarrollo sostenible en la zona costera y generar productos atractivos para la industria, ofreciendo oportunidades económicas a los cultivadores. Uno de los proyectos más relevantes ha sido el Cultivo ecosostenible de algas marinas (Seaweed Ecofriendly Aquaculture. SEA Panamá) (Robaina, García y Batista de Vega, 2008), impulsado por la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria y la Universidad de Panamá. Financiado a través de los Proyectos de Cooperación Internacional (PCI) de la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECID), este proyecto concluyó que las granjas de macroalgas desempeñan un papel importante en la protección de los ecosistemas litorales, ya que actúan como una barrera natural entre la línea de costa y la tierra firme. Además, existen otras iniciativas privadas como Gracilarias de Panamá S.A., pionera en el cultivo y exportación de algas de Panamá al mercado internacional. Esta empresa promueve la conservación de la costa panameña, fomenta la investigación y el desarrollo humano sostenible y ha establecido alianzas estratégicas con inversores locales para impulsar iniciativas innovadoras de responsabilidad social empresarial.

El Paraguay es uno de los dos países de Sudamérica, junto con el Estado Plurinacional de Bolivia, que no tiene acceso al mar. Esta realidad geográfica influye significativamente en la actividad pesquera y acuícola, limitándolas al ámbito continental, donde el desarrollo se ha centrado principalmente en cultivo de peces en colaboración con comunidades locales (Godoy *et al.*, 2016). En los últimos años, la acuicultura ha experimentado un crecimiento notable en el Paraguay, pasando de menos de 100 toneladas en el año 2 000 a 5 400 toneladas en 2012. Este incremento se atribuye a la regulación del sector a través del Plan Nacional de Desarrollo de la Acuicultura Sostenible en el Paraguay.

Por otro lado, la costa del **Perú** es una de las zonas más productivas del Pacífico sudoriental (3,5° y 18° de latitud sur), donde se han descrito numerosas especies de algas (Avila-Peltroche y Padilla-Vallegos, 2020). En la zona sur del litoral peruano se encuentran tres especies de algas pardas que han sido extraídas regularmente: *M. pyrifera*, los llamados “sargazos” *L. trabeculata* (conocida como “aracanto” o “palo”) y *Lessonia nigrescens* (conocida como “aracanto” y “negra”). Estas especies forman bosques y cinturones densos en ambientes intermareales y submareales, en algunos casos de gran extensión. Dada la importancia tanto económica, social, biológica y pesquera de estas algas, se han llevado a cabo estudios para conocer la disponibilidad real de la biomasa de algas pardas en las principales localidades del litoral centro-sur, en particular en las regiones de Ica y Arequipa, mediante extracciones exploratorias. En El Perú, la exportación de algas pardas para la extracción de alginatos se ha basado en especies como *L. berteriana*, *L. trabeculata* y *M. pyrifera*. Se ha registrado un incremento significativo en el número de empresas exportadoras, que pasaron de cinco en 1995 a 18 en 2019 (Avila-Peltroche y Villena-Sarmiento, 2022). A pesar de la

existencia de regulaciones para la extracción de algas pardas, persiste la preocupación por la sobreexplotación de estas especies y la sostenibilidad a largo plazo.

El cultivo de algas en el Perú aún se encuentra en sus primeras etapas, aunque su desarrollo en granjas está siendo impulsado, aportando hasta el momento un 4 % del total de los desembarques anuales. Se han puesto en marcha diversos proyectos para estudiar los factores que afectan el cultivo por esporas (Arbaiza *et al.*, 2021) y la propagación vegetativa de *Chondracanthus*, con la participación de pescadores en la bahía de Paracas. El aumento en el consumo y la reducción de las praderas naturales han generado un incremento en los precios de las algas. Por su parte, los niveles de producción de la acuicultura han crecido significativamente, pasando de 6 600 toneladas registradas en el año 2000 a más de 125 000 toneladas en 2013, lo que representa una tasa de crecimiento anual del 20 % entre el 2000 y el 2013 (Godoy *et al.*, 2016).

Por otro lado, la costa atlántica del **Uruguay** desempeña un papel clave en la biogeografía regional de las macroalgas, al ser una zona de transición entre la flora subtropical y la subantártica. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre en el resto de la región, el conocimiento de las macroalgas es limitado. Esta información más detallada es clave para la creación y desarrollo de una línea de base para su manejo, para la evaluación del impacto ambiental de megaproyectos, para analizar la expansión de especies invasoras y para estudiar los efectos del cambio climático. Hasta la fecha, no se conocen experiencias de cultivo de macroalgas en la costa del Uruguay.

En la **República Bolivariana de Venezuela**, entre los años 1989 y 1993, empresas privadas iniciaron cultivos de *Gracilariopsis tenuifrons* en la costa del Norte de Araya. Aunque los resultados fueron exitosos, la actividad no continuó una vez terminado el proyecto. Entre 1986 y 1994, la empresa Geles del Caribe puso en marcha el cultivo de *Gracilaria* en la zona de Cumaná, con granjas de 1 hectárea destinadas a la producción de agar. En una etapa posterior, entre 1992 y 2000, además del cultivo de esta especie local, se introdujo las especies *K. alvarezii* y *Eucheuma denticulatum* en 1996 para la producción de carrageninas en el Norte de Araya. En 1998, la empresa Biotecmar exportó algas secas en fardos a Chile y a Namibia, pero posteriormente cerró sus operaciones. Entre 2002 y 2021, se inició una tercera fase con cultivos experimentales, con el objetivo de aumentar el área cultivada. En 2008, a través de un proyecto financiado por la Fundación para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología (FUNDACITE), se desarrolló un proyecto con las comunidades locales, el cual no continuó por falta de recursos. Sin embargo, pudieron exportar implantes de *Kappaphycus* a países como México, San Vicente y las Granadinas y Santa Lucía. En los años siguientes, entre 2018 y 2019, se autorizó la extracción de *K. alvarezii* en sector de Nueva Esparta. Sin embargo, las empresas autorizadas agotaron casi por completo la biomasa existente, lo que llevó a la necesidad de relanzar la maricultura de algas en el país.

PERSPECTIVA SOCIAL Y CULTURAL (DEMOGRAFÍA, USOS Y TRADICIONES) EN AMÉRICA LATINA PARA EL CULTIVO DE ALGAS

El análisis de los países de América Latina evidencia el uso tradicional de las algas por parte de las comunidades costeras, una práctica ancestral que hoy está cobrando valor gracias al auge de la alimentación saludable en todo el mundo. Un ejemplo destacado es la síntesis aportada por Araos *et al.* (2018), que analiza la continuidad histórica del uso de algas desde la costa norte del Perú hasta el extremo sur de Chile. Su estudio muestra cómo diferentes grupos humanos, tanto prehispánicos como actuales, han estado vinculados a la extracción de algas, reflejando la persistencia de los modos de vida ligados al borde costero. Asimismo, Dillehay (2004) y Dillehay *et al.* (2008) demostraron que los primeros habitantes de América llegaron hace al menos

12 500 años, estableciendo una estrecha relación con su entorno, incluidas las algas, que fueron parte de su adaptación y supervivencia en el Nuevo Mundo.

En la **Argentina**, diversas organizaciones no gubernamentales han propuesto la creación de granjas marinas regenerativas, con el objetivo de beneficiar a las comunidades locales a través de la generación de empleo, capacitación y producción de alimentos de origen animal y vegetal con alto valor nutricional. Además, estas granjas permitirían la creación de productos con sello local, impulsando el desarrollo sostenible de las comunidades y fomentando la protección del océano.

En **Belice**, el país se está posicionando como pionero en prácticas sostenibles de cultivo de algas marinas, gracias al respaldo del Gobierno y la aprobación de nuevas políticas de maricultura en 2022, cuyo objetivo es fomentar el desarrollo y la sostenibilidad del sector junto a las comunidades costeras. El Banco Interamericano de Desarrollo (BID), a través del Mecanismo de Asociación para Competir en el Caribe (MCPC), está apoyando al gobierno de Belice en el desarrollo del cultivo sostenible de algas marinas. Esta iniciativa se llevó a cabo en colaboración con The Nature Conservancy (TNC) y el Servicio de Desarrollo del Comercio y la Inversión de Belice (BELTRAIDE). El proyecto busca fortalecer la competitividad del sector, generar empleo de los pescadores y empoderar a las mujeres y otros grupos dentro de las comunidades pesqueras, que se están viendo desplazados por los efectos del cambio climático.

En el norte del **Brasil**, el desarrollo de un proyecto de la FAO permitió que los miembros de la comunidad aprendieran fácilmente técnicas de cultivo de macroalgas rojas (*Gracilaria birdiae*), lo que se convirtió en una importante fuente de ingresos, especialmente para los sectores más pobres de la población pesquera costera. El alcance del proyecto incluyó la prueba de técnicas agrícolas en comunidades piloto, la verificación de su viabilidad técnica y financiera, el fomento del trabajo asociativo entre productores y el monitoreo del impacto social de estas nuevas prácticas. Además, se trabajó en la creación de un marco institucional para fortalecer este nuevo sector productivo (Freddi y Aguilar-Manjarrez, 2003). Como resultado, la industria del cultivo de algas experimentó un incremento de cinco veces en los precios de las algas secas recolectadas en lechos naturales o en las playas (Freddi y Aguilar-Manjarrez, 2003). En la actualidad, el kilogramo de *Gracilaria* seca se vende a 3,50 USD. De esta forma, el cultivo de algas se ha consolidado como una fuente de ingresos adicional para las comunidades costeras, como reflejan los datos publicados en 2014 por el Instituto Brasileño de Geografía.

Andrade *et al.* (2020), desarrollaron en el norte del Brasil un modelo que integra criterios de vulnerabilidad social y ambiental para identificar las zonas de cultivo con mayor potencial de sostenibilidad para el cultivo de algas. Sus conclusiones destacan que la acuicultura de macroalgas contribuye al desarrollo regional sostenible, promoviendo la generación de empleo tanto en la producción como en la elaboración de productos derivados. Por ello, la producción de algas representa una oportunidad para la inserción de comunidades costeras con bajos niveles de desarrollo socioeconómico en las políticas públicas, permitiendo la creación de modelos de desarrollo local orientados a la sostenibilidad. Esto ayudaría a reducir la desigualdad y mejorar la calidad de vida de las comunidades costeras, asegurando su sostenibilidad a largo plazo (Andrade *et al.*, *op. cit.*).

Según Reis, Castelar y Dos Santos (2017), a pesar del gran potencial del Brasil para expandir su cultivo de algas, considerando el crecimiento de los mercados y su amplia base de consumidores, esta actividad no ha logrado consolidarse debido a barreras en la cadena de producción y la falta de continuidad en los esfuerzos para involucrar a las comunidades en el sector. Aunque el Gobierno ha autorizado el cultivo de la especie introducida *K. alvarezii* en zonas de bajo impacto, no se han aprobado nuevas áreas debido al riesgo de invasión de esta especie en arrecifes coralinos. Además, se identifican

otras limitaciones que han frenado el desarrollo del sector, entre ellas: la falta de desarrollo de protocolos oficiales para el monitoreo ambiental por parte del gobierno, la integración en cooperativas de los productores para mejorar la mecanización y procesamiento de productos, la escasez de profesionales que trabajen en investigación aplicada y en acuicultura y la débil conexión entre investigadores, comunidades y Gobierno, lo que ralentiza el crecimiento y consolidación de la actividad.

En el conjunto de **países del Caribe**, no existen registro de producciones comerciales de acuicultura de algas. No obstante, se han llevado a cabo diversos proyectos comunitarios con el objetivo de diversificar y mejorar los medios de vida de las comunidades ribereñas, contribuyendo así al aumento de sus ingresos familiares.

El Instituto de Investigaciones Marítimas y Costeras (INVEMAR) estimó en 2011 que la población de pescadores artesanales en el mar Caribe colombiano era de 13 429, distribuidos en 153 poblaciones de 28 municipios a lo largo de la costa. En el Pacífico colombiano, se contabilizaron 11 970 pescadores en 122 comunidades de 14 municipios a lo largo de la costa. En cuanto a la pesca continental, se calcula que existen 56 500 pescadores, de los cuales 46 000 pertenecen a la cuenca del Magdalena. Tanto la pesca continental como la pesca marina han mostrado un descenso progresivo en las capturas, mientras que la producción de la acuicultura ha crecido significativamente, pasando de 572 toneladas en 1985 a 89 140 toneladas en 2014.

En **Chile**, el uso de algas por parte de las comunidades costeras se remonta a hace 14 000 años (Dillehay *et al.*, 2008). Actualmente, la acuicultura de algas en el país es una actividad artesanal, extensiva y monoespecífica, desarrollada en un 84 % por personas naturales no asociadas. Del total de acuicultores, solo un 7 % pertenece a sindicatos, un 2 % de asociaciones gremiales y un 7 % está constituido como personalidad jurídica, lo que incluye empresas individuales de responsabilidad limitada (EIRL), sociedades anónimas, sociedades de responsabilidad limitada y cooperativas (UCV, 2019). Esta baja organización del sector lo atomiza, reduce su competitividad y genera un bajo poder de negociación. Actualmente, hay 1 089 acuicultores de pequeña escala registrados, de los cuales 784 (71 %) son pescadores artesanales. Sin embargo, solo 2 084 pescadores artesanales (2,3 % del total de 89 697 registrados) han iniciado actividades comerciales (SERNAPESCA, 2023). La estrecha relación entre la acuicultura de pequeña escala (APE) y la pesca artesanal dificulta el acceso al financiamiento bancario, ya que solo el 11 % de las organizaciones de pescadores artesanales y sus miembros han accedido al crédito formal (INE, 2012). Esto se debe, en gran parte, a la falta de formalización ante el Servicio de Impuestos Internos (SII).

En Chile, la Ley 21.069, publicada el 15 de febrero de 2018, crea el Instituto Nacional de Desarrollo Sustentable de la Pesca Artesanal y de la Acuicultura de Pequeña Escala (INDESPA). Entre sus objetivos se encuentra el desarrollo armónico e integral de las caletas, consideradas espacios geográficos clave para el desarrollo social, económico y cultural de los pescadores artesanales.

En **Costa Rica**, desde hace algunos años se ha desarrollado el proyecto Desarrollo del potencial de las macroalgas marinas de Costa Rica para el cultivo y uso, con el objetivo de proporcionar beneficios sociales a las comunidades ribereñas, así como innovar e integrar tecnologías para el aprovechamiento de las macroalgas, por ejemplo, en panadería, fomentando así el consumo de alimentos saludables. Esta iniciativa se aplica en el Pacífico Norte y en el Caribe, con el propósito de que las poblaciones costeras se familiaricen con el cultivo de macroalgas. Al mismo tiempo, se les proporciona el acompañamiento necesario para abrir y desarrollar este nuevo mercado, lo que permite diversificar la oferta productiva y generar ingresos mediante una actividad innovadora y de bajo costo.

En **México**, más allá de los desafíos técnicos, la acuicultura de algas se perfila como una actividad estratégica para las comunidades locales, que enfrentan dificultades debido a la precariedad laboral, los bajos precios de los productos, la especulación, las restricciones regulatorias y la legislación pesquera en el Golfo de México y el Caribe. El único caso descrito en la literatura sobre el involucramiento de comunidades en la acuicultura de algas es en Dzilam de Bravo (Robledo, Gasca-Leyva y Fraga, 2013), donde se introdujo *K. alvarezii* con el objetivo de evaluar su potencial para el cultivo comercial en Yucatán. Esta iniciativa, desarrollada en la década de 1990, fue coordinada por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, con el respaldo del Estado y la participación de 33 pescadores de la comunidad. También se han registrado experiencias de cultivo con *Gracilaria cornea* y *Eucheuma isiforme*, en las que pescadores locales mostraron interés en desarrollar cultivos con *G. cornea* en la zona de Mina de Oro. En el año 2000, se impulsaron programas de cultivo con empleos temporales para dos comunidades, lo que permitió la instalación de una granja de cultivo de *G. cornea* en Dzilam, cuya producción se destinó a la industria de agarosa en España. Este proyecto contó con el apoyo de la Agencia Canadiense de Desarrollo Internacional (IDRC), que incluyó asesoría en aspectos sociales y de género relacionados con el cultivo. En 2002, se estableció otro cultivo de *K. alvarezii* en Dzilam de Bravo para la producción de carrageninas, con el respaldo de la Secretaría de Educación Pública (SEP). Sin embargo, la granja fue destruida por el huracán Isidora en 2002 (Robledo, Gasca-Leyva y Fraga, 2013).

En **Panamá**, la utilización de las algas marinas por parte de grupos étnicos locales se remonta a 1850, coincidiendo con la llegada de grandes grupos de trabajadores afrocaribeños para la construcción tanto del ferrocarril interoceánico y, posteriormente, del Canal de Panamá. Estos inmigrantes introdujeron el consumo de macroalgas en la alimentación, siguiendo las costumbres gastronómicas del Caribe insular, que hasta entonces eran desconocidas por la mayoría de la población panameña de ascendencia europea, principalmente española (Batista de Vega, 2014). Por otro lado, la actividad de empresas privadas en la acuicultura de algas ha promovido la integración de comunidades costeras y grupos indígenas en el desarrollo de granjas de cultivo, lo que ha generado ingresos adicionales para las familias y ha impulsado la participación de mujeres en nuevas oportunidades laborales. De forma paralela, estas empresas fomentan la conservación y protección de los ecosistemas de manglares y arrecifes de coral, al mismo tiempo que invierten en investigación científica, brindando así oportunidades de desarrollo sostenible a las comunidades Guna y Afroantillanas (Robaina, García y Batista de Vega, 2008).

En **el Paraguay**, el Censo Agropecuario Nacional (CAN) de 2008, registró 2 816 acuicultores y 6 660 340 metros cuadrados de espejo de agua explotados para la acuicultura. Los datos muestran que el 81 % de los acuicultores residen en sus propias fincas y gestionan el 68,42 % de la superficie explotada; el 98 % de estos acuicultores de recursos limitados (AREL), usan estanques menores a 0,01 hectáreas, y utilizan la piscicultura principalmente como complemento para reforzar su seguridad alimentaria. Solo una pequeña proporción vende excedentes en mercados locales; el 2 % restante, conformado por micro y pequeñas empresas (MYPEs), tiene una orientación comercial exclusiva, con granjas que superan las 50 hectáreas de espejo de agua. Estas cifras son interesantes por el potencial uso de algas en estos estanques en tierra.

En **el Perú**, la población tiene una larga tradición en el consumo interno de alga fresca. en platos como el ceviche, o seca y salada, en ensaladas. Entre las especies más consumidas se encuentran *Chondracanthus chamissoi*, conocida como “yuyo” o “mococho”, y *Pyropia/Porphyra*, llamada localmente como “cochayuyo”. Antes de

la Conquista, los pueblos costeros consumían algas junto con pescado seco y seco-salado; además de utilizarlas como producto de intercambio en el comercio y trueque con otros productos agrícolas de la sierra. Hoy en día, algunas de estas algas se venden en los mercados locales, donde se pueden encontrar frescas (yuyo) y semisecas y seco-saladas (cochayuyo), principalmente para consumo humano. El consumo de algas varía según la región. Mientras que las personas provenientes de la sierra son quienes más las incluyen en su dieta, por ejemplo, en el picante de cochayuyo, los habitantes de las costas en general no la conocen ni las consumen habitualmente. El alguero de Ilo refleja muchas de las características de la pesca artesanal en el país. En su mayoría, provienen de Ilo o de Puno, y participan tanto jóvenes como adultos, hombres y mujeres, asociados o en grupos familiares. Esta actividad puede ser su ocupación principal o secundaria, debido a los bajos niveles de producción generados por el mar. Su labor está estrechamente ligada a la recolección de *L. trabeculata* y *L. nigrescens* y en general trabajan de manera asociativa y gremial. Actualmente, existe un creciente interés en el cultivo de *Porphyra/Pyropia* (Arbaiza *et al.*, 2019), con la participación de agrupaciones de pescadores en la localidad de Pisco (el Perú central), donde se está explorando su procesamiento en harina para la industria panadera.

El Perú está comenzando a priorizar proyectos de cultivo integrado, donde colaboran universidades, empresas y pescadores, con el objetivo de diversificar la producción acuícola. Estos proyectos consideran factores económicos (Hurtado, Neish y Critchley, 2019), asegurando la sostenibilidad de la actividad tanto a corto como a largo plazo. La diversificación acuícola hacia el cultivo de macroalgas en el Perú se ha aplicado en la bahía de Sechura, como estrategia de mejora y garantía de sostenibilidad de la producción acuícola. Con la producción de algas se busca generar una diversidad productiva que garantice un retorno económico, combinándola con los cultivos tradicionales de concha de abanico (*Argopecten purpuratus*), avanzando hacia una visión multitrofica de la acuicultura (Arbaiza *et al.*, 2021).

En cuanto a la regulación, en 2013 se contabilizaba en el Perú un total de 4 575 derechos otorgados para el desarrollo de la acuicultura, distribuidos de la siguiente manera: 128 derechos otorgados a empresas de mayor escala o industriales; 1 921 derechos asignados a pequeñas y medianas empresas dedicadas a la acuicultura en menor escala; 2 248 derechos para usuarios cuya actividad se da a nivel de subsistencia o con recursos limitados y que emplean la acuicultura como aporte a su propia seguridad alimentaria; 209 derechos corresponden a asociaciones de pescadores artesanales, comunidades campesinas y nativas, que desarrollan actividades de repoblamiento.

A pesar de estos registros, existe una importante informalidad en el desarrollo de la actividad de acuicultura, principalmente en la acuicultura continental. De los 4 314 acuicultores censados, el 52 % declaró no contar con el derecho correspondiente otorgado por la autoridad competente. La actividad acuícola continental es realizada principalmente por personas naturales, mientras que la actividad acuícola en el ámbito marino es realizada en su mayor parte por personas jurídicas (Godoy *et al.*, *op. cit.*).

En la **República Bolivariana de Venezuela**, se han llevado a cabo numerosas iniciativas para la acuicultura de algas, sin embargo, ninguna ha logrado consolidarse comercialmente a lo largo del tiempo, lo que ha dificultado el éxito empresarial en este sector. Según lo señalado por R. Rincones (comunicación personal, 2024), el cultivo de macroalgas genera beneficios sociales al promover la inclusión social y la equidad de género, crear nuevas fuentes de empleo en zonas desfavorecidas, mejorar la calidad de vida de las personas y reducir los movimientos migratorios debido a la falta de empleo. Asimismo, representa una alternativa viable para aquellas personas que antes dependían de la pesca industrial en los estados de Falcon, Esparta y Sucre. Los beneficios económicos del cultivo de algas incluyen una mayor independencia financiera para las comunidades, diversificación de actividades productivas, creación de una nueva industria de algas en

el país y fortalecimiento de la cadena productiva. Además, contribuye a la generación de empleo, aumenta los ingresos de las comunidades beneficiadas y permite la mejora de los ingresos económicos de las comunidades beneficiadas.

En el Cuadro 1 y Figura 4 se presentan un resumen de las iniciativas desarrolladas en diferentes países para el inicio y desarrollo del cultivo de algas.

PERSPECTIVA DE GÉNERO EN AMÉRICA LATINA PARA EL CULTIVO DE ALGAS

Desde épocas prehispánicas, las mujeres que habitan las zonas costeras, las orillas de los ríos, caños y ciénagas en América Latina han mantenido una relación directa con las actividades de pesca, recolección y aprovechamiento de los recursos naturales que estos ecosistemas brindan a sus comunidades. Según el informe de 2014 del Grupo de Alto Nivel de Expertos en Seguridad Alimentaria y Nutrición (HLPE, por sus siglas en inglés), el primer intento exhaustivo por calcular el número de trabajadores del sector pesquero a nivel mundial determinó que aproximadamente 56 millones de mujeres participan en esta actividad. Esta cifra representa casi la mitad de los 120 millones de personas que trabajan en la pesca de captura y sus cadenas de suministro (Godoy *et al.*, 2016).

En términos generales, la información desagregada por género en el sector pesquero y acuícola de América Latina sigue siendo heterogénea y poco actualizada. No obstante, en los últimos años está constituyendo un aspecto relevante en las estadísticas pesqueras y de acuicultura. Por ejemplo, en Chile, desde 2004 existe el Registro Pesquero Artesanal del Servicio Nacional de Pesca de Chile (SERNAPESCA), que ha implementado mejoras constantes en su sistema de recolección de datos e incluye información desglosada por sexo (Godoy *et al.*, *op. cit.*). Sin embargo, persisten dificultades adicionales para obtener información sobre las características sociodemográficas básicas, como el nivel educativo, la edad y el estado civil de las mujeres dedicadas a la pesca y la acuicultura. Un caso destacado es el caso del Perú, donde en 2013, el Censo Nacional de la Pesca Continental (CENPAC) recopiló información específica sobre el nivel educativo de las mujeres en el sector acuícola y pesquero continental.

La participación de las comunidades en actividades de cultivos de algas es una constante en la información revisada de los distintos países, con un papel especialmente relevante para las mujeres.

En **Belice**, hay antecedentes de una activa participación de las comunidades en actividades de recolección y de formación de agrupaciones de mujeres cultivadoras de algas marinas comestibles para uso interno. Pequeños productores, como *Turneffe Fishers*, la Asociación de Mujeres Cultivadoras de Algas Marinas de Belice y la Cooperativa de Placencia, llevan más de 40 años cultivando algas rojas autóctonas comestibles. Estas iniciativas han facilitado el camino de la industria nacional y han establecido granjas frente a la costa de Placencia y dentro de la Reserva Marina del Atolón Turneffe. A pesar de que el mercado nacional en 2020 fue de apenas 5 toneladas, el mercado internacional de algas marinas producidas en Belice es una industria multimillonaria, con una tasa de crecimiento anual del 9 % al 10 % (Sanchiz, 2024).

En **el Brasil**, las algas representan una fuente de ingresos clave y sustentan los medios de vida de muchas personas en las comunidades costeras. Sin embargo, la cosecha de algas se considera una actividad secundaria, realizada sin la participación de los jefes de familia, que generalmente son pescadores. Por otro lado, para muchas mujeres, la recolección se considera su ocupación principal, incluso si se realiza solo a tiempo parcial, durante la marea baja. La recolección se realiza en las costas o buceando desde una pequeña embarcación (jangadas), cuando las algas están más alejadas. Esta actividad es llevada a cabo principalmente por mujeres y sus hijos equipados con una bolsa de red. Una vez cosechadas, las algas se transportan a la costa y se secan al sol durante dos

o tres días. Finalmente, las algas secas se venden a un recolector intermedio y se utilizan para la producción de agar o carragenano.

En 2006, el Instituto de Desarrollo Local y Regional (IDER), instaló con el apoyo de la comunidad el Centro de Procesamiento de Algas en la playa de Flecherías. En este centro, la Asociación de Productores y Procesadores de Algas de Flecheiras y Guajiru (APAFG) hace todo el procesamiento de las algas marinas de forma más organizada, especialmente de la especie *G. birdae*. Además del procesamiento, la comunidad aprovecha el material para hacer artesanías o productos como cosméticos y alimentos, lo que incrementa todavía más la economía local. Las algas contienen un gel llamado agar, indispensable en la fabricación de medicamentos, champús, jabones, jaleas, pastillas y otros productos. El éxito del proyecto se refleja en el Festival de Algas, organizado por el Servicio de Apoyo a las Micro y Pequeñas Empresas (SEBRAE) desde 2004. El objetivo del evento es divulgar la producción sostenible de algas marinas y la gran diversidad de productos que pueden ser realizados a partir de la alguicultura. Otro reconocimiento importante para el SOS Algas fue su inclusión entre los 12 finalistas del *World Challenge 2007*, un premio organizado por Shell, el canal británico BBC y la revista *Newsweek*. El director del IDER espera que ayude a atraer apoyo institucional para perfeccionar y expandir el proyecto. A futuro, la APAFG busca ampliar el Centro de Procesamiento de Algas, involucrar a más familias y replicar el proyecto en otras comunidades, con el fin de consolidar una cadena productiva. Tanto la comunidad como las entidades involucradas esperan que este modelo fortalezca el sector, impulse la producción de algas y refuerce su papel socioambiental (OESA, 2007).

En **Chile**, a mayo de 2023, se registraron 939 titulares de centros de cultivos, de los cuales un 20 % son mujeres (SUBPESCA, 2023). Por lo general, las mujeres cultivan de manera formal, algas y los hombres moluscos (SERNAPESCA, 2023).

A pesar de la creciente integración femenina en la pesca y acuicultura a pequeña escala en Chile y en otros lugares, los aspectos de género del uso de los recursos marinos y cómo esto influye en las mujeres en particular y cómo se distribuyen los beneficios, son unas áreas muy poco estudiadas (Gallardo-Fernández *et al.*, 2024; Álvarez *et al.*, 2017). En el sector pesquero artesanal chileno, ha existido históricamente una brecha de género, aunque esta ha ido cambiando con la entrada formal de mujeres en el sector desde 2004 y en adelante, especialmente como recolectoras de algas. Este reciente cambio pone de manifiesto la importancia del papel de la mujer en un ámbito que hasta hace poco estaba fuertemente dominado por los hombres. En 2019 se registraron 20 003 mujeres como recolectoras de algas, lo que representa el 28,5 % del total de pescadores artesanales del país (SERNAPESCA, 2019).

Las mujeres desempeñan un papel clave en la innovación y la gestión de la acuicultura. Generalmente, tienen un nivel educativo algo superior al de los hombres, lo que les proporcionan mayores competencias en lectura, escritura y cálculo. Estas habilidades les facilita el establecimiento de contactos con organismos públicos, organizaciones no gubernamentales (ONG) y centros de investigación, lo que les permite gestionar formularios para nuevas actividades o proyectos. Las principales innovaciones propuestas por mujeres en el sector acuícola incluyen la producción de: harina de algas con marca de denominación de origen; fertilizante para actividades agrícolas locales; cosméticos; productos gastronómicos de algas y repostería local (Gallardo-Fernández *et al.*, 2024; Valenzuela-Valenzuela, Rivera-Corvalán y Cartes-Velásquez, 2020).

En el sur de Chile, hombres y mujeres trabajan de forma complementaria en la acuicultura de algas, lo que confiere a la actividad laboral un carácter familiar. La participación de ambos no parece traducirse en un reparto más equitativo de la carga de trabajo dentro del hogar, donde el mayor peso del trabajo doméstico sigue recayendo en las mujeres. La falta de viabilidad de los ingresos procedentes únicamente de las

actividades relacionadas con la producción de algas genera una serie de impactos negativos, entre ellos, la necesidad de que los hombres se desplacen a otros lugares para trabajar. Que esto suceda divide a las familias, amenaza las sinergias de género evidentes en la práctica de la acuicultura y socava la capacidad de acción colectiva de la comunidad local, ya que muchos de sus miembros clave están ausentes durante largos periodos de tiempo.

Según comenta Flores (2020), en **Colombia**, diversas organizaciones de acuicultores en el Departamento del Meta han establecido mecanismos estatutarios para garantizar la equidad y la alternancia en los cuadros directivos. Gracias a esta iniciativa, estas asociaciones cuentan de forma alterna con mujeres líderes al frente de la gestión y administración de los activos productivos.

En **Colombia y el Paraguay**, la participación de mujeres en la producción acuícola es significativa, oscilando entre el 47 % y el 72 % (Godoy *et al.*, 2016).

En **México**, las mujeres han logrado ampliar su presencia en la acuicultura y la pesca a pequeña escala, formando cooperativas acuícolas y participando en diversas actividades productivas. Se dedican principalmente al cultivo de especies para alimentación, la producción de peces de ornato y de algas marinas. Además, elaboran artesanías a partir de subproductos de la acuicultura, como aretes, collares de escamas y cinturones de piel de pescado. Esta actividad suele desarrollarse en un entorno familiar, ya que una granja acuícola se considera un patrimonio familiar (Vásquez, 2014).

En **Panamá**, la empresa Gracilarias de Panamá S.A., ha impulsado el desarrollo de capacidades productivas en mujeres indígenas guna en el cultivo de algas marinas. En colaboración con la FAO, estas mujeres recibieron apoyo para la creación y administración de un fondo rotatorio y la organización de una cooperativa para vender sus productos. En 2022, lograron su primera cosecha, donde aprendieron a secar las algas y extraer agar para la elaboración de jabones y cosméticos (FAO, 2022b).

En **el Perú**, al igual que en otros países de América Latina, el trabajo de las mujeres en las actividades de pre y postcaptura ha permanecido invisibilizado. No obstante, gracias al impulso de lideresas en ICA, se logró la aprobación de una Ordenanza del Gobierno Regional, que señala que no se puede discriminar el trabajo de la mujer (Mendonza, 2024). Según el Censo Nacional de Pesca Artesanal (CENPAR), apenas un 14 % de los pescadores artesanales registrados son mujeres. Sin embargo, este censo solo registra a las personas ubicadas en las labores de extracción de los recursos.

Según Vaccaro (2023), hasta la fecha no existen estudios específicos sobre la participación de las mujeres en el sector pesquero de la corriente de Humboldt en el Perú. Este documento es el primero en su género y revisa la literatura con el fin de entender las tendencias y retos globales sobre la participación femenina en el sector, identificar y caracterizar a las mujeres solo vinculadas a la pesca y actividades conexas en los distritos de intervención (Ático, Changuillo, Marcona, Pisco), ya que el sector de acuicultura de algas es incipiente. Es interesante resaltar que en el Perú existe una diferencia importante en la asociatividad entre mujeres pescadoras y acuicultoras, ya que estas últimas realizan su trabajo mayoritariamente de manera asociativa.

En **el Perú y Chile**, las mujeres están principalmente dedicadas a la transformación y comercialización de productos marinos. La labor de las mujeres en la postcaptura permite agregar valor a los productos cosechados, y con esto una más rápida comercialización y recuperación de la inversión en tiempo y dinero (Godoy *et al.*, 2016).

No obstante, la creciente participación de la mujer en la pesca podría haber llegado para quedarse, dado su empoderamiento y liderazgo en el sector. Sin embargo, debemos una mirada crítica ante el hecho de que las mujeres pueden caer fácilmente en la trampa del doble trabajo, aún sin remuneración por las tareas de reproducción (Gallardo-Fernández *et al.*, 2024).

Cabe mencionar la creciente participación de las mujeres que trabajan en el mar en organizaciones gremiales a nivel local, regional, nacional e internacional, siendo parte de directivas de organizaciones de base, como sindicatos, agrupaciones pesqueras, federaciones, confederaciones y uniones internacionales de pescadores artesanales. Las redes de trabajo internacional latinoamericanas e iberoamericanas, han estado apoyadas por la FAO y la Alianza del Pacífico.

Álvarez (2020) comenta que los roles tradicionales de las mujeres en la pesca artesanal han sido reducidos al espacio doméstico, invisibles y con trabajos informales. Estos han estado vinculados a labores de cuidado y reproducción, así como la preparación de las artes de pesca, la recolección de orilla y la comercialización. Sin embargo, el quehacer de las mujeres en la pesca ha sido dinámico y sensible a los cambios socioculturales, económicos y ambientales del país. Su trabajo es fundamental para la subsistencia de localidades costeras rurales y la actividad pesquero-artesanal en sí misma. Este último punto es relevante, debido a la visión de conjunto de las mujeres, que se relaciona con la sostenibilidad de los recursos pesqueros, la preocupación por el medio ambiente y el manejo de residuos, así como, más recientemente, con el cambio climático y las catástrofes naturales que se están manifestando en el borde costero. Lo anterior no solo les permite estar preparadas para el devenir diario de sus comunidades, sino también mantener la identidad de las comunidades costeras, la gastronomía típica basada en recursos marinos y los modos de vida en las caletas, aun cuando en los últimos tiempos se ha ido incorporando, de manera paulatina, un modelo más individualista (Avila *et al.*, 2021).

En general, se observa prácticamente en todos los países de la región un creciente número de mujeres profesionales que trabajan en diversos ámbitos de la investigación e innovación, tanto en instituciones académicas como en empresas de biotecnología, genética aplicada, inteligencia de mercados y otros campos que dan soporte a la acuicultura. Además, en el ámbito de la gestión gubernamental, en diversos países la acuicultura y la pesca han estado bajo la dirección de mujeres, como ha sido el caso de Belice, El Salvador, Chile, el Perú y Panamá. Paralelamente, la perspectiva de género ha sido incorporada en la agenda de muchos países, lo que ha llevado a la creación de ministerios especializados en esta temática y, en particular, en el rol de la mujer en sectores como la pesca y acuicultura.

CONCLUSIONES

Perspectiva del territorio

América Latina, como extensión geográfica, presenta zonas marino costeras con altas tasas de biodiversidad, que brindan importantes servicios ecosistémicos y beneficios tangibles en términos de medios de subsistencia, seguridad alimentaria, secuestro y almacenamiento de carbono, transporte marítimo y oportunidades recreativas. Así, las contribuciones de la naturaleza a las personas dependerán del buen funcionamiento de estos ecosistemas, los cuales deben afrontar diferentes presiones que afectan su estado y capacidad de resiliencia. Por ello, es fundamental conocer las condiciones actuales de la biodiversidad en la región y sus tendencias futuras, especialmente en un contexto donde el cambio climático incrementa la presión sobre los sistemas naturales que la sustentan.

La proyección de la actividad acuícola en pequeña escala en los próximos años debe ir de la mano con la conservación de los ecosistemas marino costeros, donde la

presencia de las macroalgas desempeña un papel importante como amortiguador del cambio climático. Por ello, el resguardo de zonas como áreas marinas protegidas junto a las comunidades marino costeras, pueden ser un aporte real no solo para las metas de biodiversidad, sino también como resguardo de alimento para generaciones futuras, como de las actividades sociales, económicas y culturales de estas comunidades.

Perspectiva social y cultural

El cultivo de macroalgas en pequeña escala puede ser una alternativa viable para satisfacer las demandas del mercado, pero su desarrollo debe ser de manera responsable, sostenible y equitativo.

El análisis de la perspectiva de la industria de la acuicultura de macroalgas en América Latina, confirma que la mayor producción de macroalgas proviene de la cosecha de las praderas naturales, por lo que es urgente incluir aspectos más críticos en la regulación del cultivo de macroalgas basado en buenas prácticas y en desarrollo de granjas marino costeras. Estas iniciativas no solo impulsan la economía local, sino que también crean espacios de trabajo colaborativo y educativo, donde científicos, técnicos, líderes comunitarios y gobiernos locales han encontrado respuestas al desarrollo de los cultivos de manera contextualizada.

La revisión realizada dio cuenta de grandes diferencias de desarrollo en el cultivo de algas en América Latina, debido a diferencias socioeconómicas, culturales y ambientales. De esta forma la obtención de biomasa de algas requeridas, que podría entonces provenir del cultivo, necesita de miradas actualizadas en donde se incorporen aspectos de vulnerabilidad social y ambiental, especialmente en el contexto del cambio climático global.

A pesar de los esfuerzos desplegados en la región, las pocas experiencias exitosas replicables son escasas. Un ejemplo de ello es el cultivo del pelillo en Chile, que se ha mantenido por más de dos décadas, gracias a su desarrollo en comunidades con líderes colaborativos y caracterizada por ser una actividad de carácter familiar, lo que, junto con la proximidad entre el ámbito residencial y espacios de producción, subraya aún más los roles complementarios que desempeñan hombres y mujeres.

Entre los países que componen América Latina, solo siete cuentan con planes o políticas nacionales para el desarrollo de la acuicultura: la Argentina (UCAR 2015), el Brasil (AMP 2015), Chile (SUBPESCA 2003), Colombia (AUNAP 2014), Costa Rica (MIDEPLAN 2014), El Salvador (MAG 2016), el Perú (PRODUCE 2010) y el Uruguay (DINARA 2008). De estos, solo el Brasil, Chile y el Perú mencionan programas para el cultivo de macroalgas. Todas las políticas contaron, de alguna manera, con el apoyo de la FAO, así como con lineamientos para la organización y promoción de una acuicultura sostenible.

Actualmente, se habla de la “transformación azul” en la acuicultura, que implica el aprovechamiento sostenible e integral de los ecosistemas acuáticos. En los próximos 10 años, la expansión de la acuicultura debe ser de forma sostenible y bajo esos parámetros, para atender la demanda mundial en auge de alimentos acuáticos.

El Estado, el sector privado y la sociedad civil desempeñan un papel clave en la inversión para abrir nuevos mercados, desarrollar plataformas comerciales digitales, adaptar la infraestructura acuícola al cambio climático y fortalecer la colaboración entre ciencia y producción, a través de alianzas estratégicas y proyectos de investigación aplicada a nivel local.

La identificación de los problemas y el diseño de las soluciones de investigación, deben incluir los conocimientos de campo y tradicionales de los ribereños y las comunidades, conocedores de su entorno. Esto permite una mejor apropiación de los resultados y beneficios de las tecnologías mejoradas a través de los procesos de extensión. En este sentido, las ONG y la sociedad civil juegan un papel fundamental.

Lo anterior conlleva un proceso a largo plazo que debe sustentarse de manera conjunta y respetando los tiempos de las comunidades, una estrategia que ha demostrado ser efectiva con el desarrollo de escuelas de campo dedicadas a la acuicultura en algunos países del mundo. Estas iniciativas, basadas en la experiencia práctica para agricultores, han sido promovidas por la FAO. Se ha tratado de metodologías de aprendizaje innovador, participativo e interactivo, donde jóvenes, mujeres, hombres y familias planifican el desarrollo de sus actividades, combinando saberes tradicionales e innovaciones científicas.

Perspectiva de género

Las brechas existentes en la disponibilidad de información estadística desagregada por género dificultan el conocimiento detallado sobre las características, situación y condiciones particulares de las comunidades que trabajan directamente en el sector de las algas, su cosecha y cultivo, así como el rol de las mujeres en estas actividades. Este problema se agrava debido a la escasa capacidad para realizar análisis desde un enfoque de género lo que mantiene a las mujeres del sector en una situación de invisibilidad. Esta falta de reconocimiento impacta negativamente en la definición de políticas públicas, así como en la toma de decisiones y en la implementación de acciones para su empoderamiento económico y social. En este contexto, el Perú y Chile se destacan como excepciones, debido a la existencia de iniciativas como el Censo Pesquero en Perú y el Registro Pesquero Artesanal en Chile, que han visibilizado el papel de la mujer en la pesca y la acuicultura, así como su respuesta ante tensiones y crisis ambientales y productivas. Se estima que en 2020, las mujeres representaban alrededor del 50 % de la fuerza laboral en el sector pesquero y acuícola a nivel mundial. Sin embargo, solo el 28 % de ellas participaban en actividades de acuicultura.

Promover leyes innovadoras, como la Ley N° 20.925 en Chile, destinada a beneficiar a pescadores artesanales y pequeñas empresas para el cultivo de algas y la repoblación de bancos naturales, es fundamental para promocionar esta actividad y proteger el entorno natural. Si bien la expansión de las iniciativas acuícolas presenta beneficios prometedores, también plantea desafíos de sostenibilidad, relacionados con:

- Las dinámicas de género y relaciones intracomunitarias.
- La gobernanza y el poder de mercado.
- La distribución equitativa de los beneficios.
- Los impactos medioambientales locales de la producción acuícola.

A continuación, los Cuadros 1 y 2 resumen los principales aspectos territoriales, sociales y de género, descritos anteriormente, y subrayan la importancia de enfocar futuros esfuerzos en dos áreas prioritarias:

- Desarrollar proyectos en la región para viabilizar el cultivo de algas a pequeña escala.
- Fomentar el registro de información sobre la acuicultura a pequeña escala, con datos desagregados por género.

CUADRO 1
 Síntesis de las iniciativas realizadas en cultivo de algas por especie y territorio considerando aspectos sociales y de género en América Latina

País	Especie o recurso cultivado	Territorio y permisos	Referencias	Social	Referencias	Género	Referencias
MÉXICO	<i>Macrocyctis pyrifera</i> y <i>Ecklonia arborea</i>	Permiso de acuicultura 2020, en Bahía Salsipuedes, norte de México.	Empresa AlgaMar (com. pers.) Iniciativa privada	Dzilam de Bravo, Yucatán. Introducción de <i>K. alvarezii</i> .	Robledo, Gasca-Leyva y Fraga, 2013	Actividad familiar. La granja acuicola se considera un patrimonio familiar.	Vásquez, 2014.
BELICE	<i>Gracilaria crassissima</i> y <i>Euclidean isiforme</i>	Granjas frente a la costa de Placencia y dentro de la Reserva Marina del Atolón Turneffe.	https://blogs.iadb.org/innovacion/es/el-despertar-de-una-industria-inactiva-de-la-economia-azul-la-maricultura-de-algas-en-belice/	Experiencia reciente (2022) con TNC.	https://www.nature.org/es-us/sobre-tnc/donde-trabajamos/tnc-en-latinoamerica/belice/acuicultura-para-la-restauracion-costera-en-belice/	Pequeños productores, como Turneffe Fishers, la Asociación de Mujeres Cultivadoras de Algas Marinas de Belice y la Cooperativa de Placencia.	https://blogs.iadb.org/innovacion/es/el-despertar-de-una-industria-inactiva-de-la-economia-azul-la-maricultura-de-algas-en-belice/
PANAMÁ	<i>Gracilaria, Eucheuma</i> y <i>Kappaphycus</i>	Cultivo comercial desde el año 2000 en zona costera del Caribe panameño, al noreste del Canal de Panamá	Proyecto SEA Panamá (público para comunidades costeras). Empresa <i>Gracilarias</i> de Panamá (iniciativa privada).	Uso por grupos étnicos panameños e inmigrantes afrocaribeños. Oportunidades de desarrollo sostenible a las comunidades Guna y Afroantillanas.	Batista de Vega, 2014 Robaina, García y Batista de Vega, 2008	Algas <i>Gracilarias</i> han apoyado a desarrollar la capacidad de las mujeres indígenas guna en el cultivo de algas marinas.	https://www.fao.org/faostat/stories/article/es/c/1538466
VENEZUELA (REPÚBLICA BOLIVARIANA DE)	<i>Gracilariopsis tenuifrons</i> <i>Kappaphycus alvarezii</i> y <i>Eucheuma denticulatum</i>	Norte de Araya (1985–1994) Mismo sector (1992–2000) 2002–2021 2018-2019 se autoriza la extracción en sector de Nueva Esparta.	Empresa Geles del Caribe (iniciativa privada). Empresa Biotechmar. Produce algas para exportación.	No hay información publicada disponible.	No hay información publicada disponible.	No hay información publicada disponible.	
COLOMBIA				Estimación de 13 429 pescadores artesanales para el mar Caribe colombiano, ubicados en 153 poblaciones de los 28 municipios a lo largo de la costa, y 11 970 para el Pacífico, ubicados en 122 comunidades de 14 municipios a lo largo de la costa.	Godoy et al., 2016	Garantías para asegurar la equidad y la alternancia en los cuadros directivos.	Flores, 2020
BRASIL	<i>Kappaphycus alvarezii</i>	1995 se introduce la especie al país. 2020 se autoriza el cultivo de la especie <i>Kappaphycus alvarezii</i> en granjas experimentales en Santa Catarina. 2001 mediante proyecto de la FAO, se capacita a comunidades costeras para el cultivo de <i>Gracilaria birdiae</i> .	Santos y Hayashi, 2022.	Norte del Brasil cultivo de macroalgas rojas (<i>Gracilaria birdiae</i>) con comunidades.	Freddi y Aquilar-Manjarrez, 2003	Importante fuente de ingresos y sustentan los medios de vida de muchas personas en las comunidades costeras. Mujeres del nordeste del Brasil apoyadas por el IDER.	https://www.observatorio-acuicultura.es/comunicacion/actualidad/brasil-comunidad-desarrollo-extractivismo-sustentable-y-ecologico-de-algas

CUADRO 1 (CONTINUACIÓN)

País	Especie o recurso cultivado	Territorio y permisos	Referencias	Social	Referencias	Género	Referencias
PARAGUAY				Solo hay dato de Censo Agropecuario Nacional (CAN) de 2008 registró 2 816 acuicultores y 6 660 340 metros ² de espejo de agua explotados para la acuicultura en tierra.	Godoy et al., 2016		
PERÚ	<i>Chondracanthus chamicoi</i>	Pescadores de Bahía de Paracas.	Arbaiza et al., 2019	Desde antes de conquista española, gran consumo interno de alga fresca platos típicos. Las especies más consumidas son <i>C. charmissoi</i> conocida como "yuyo" o "mococho" y <i>Pyropia/Porphyra</i> conocida localmente como "cochayuyo". 2013 se contabilizó total de 4 575 derechos otorgados para el desarrollo de la acuicultura. Actividad muy informal. Actividad acuícola en tierra realizada principalmente por personas naturales (93 %) y la marina por personas jurídicas (93 %). Experiencias con pescadores en Bahía de Sechura.	Godoy et al., 2016	Ordenanza del Gobierno Regional señala la no discriminación por sexo. Censo Nacional de Pesca Artesanal (CENPAR), 14 % de los pescadores artesanales registrados son mujeres; este censo solo registra a las personas ubicadas en las labores de extracción de los recursos. Arbaiza, et al, 2021	https://peru.un.org/es/262635-mujeres-del-mar-creando-olas-de-cambio
CHILE	<i>Gracilaria chilensis</i> <i>Macrocystis pyrifera</i> <i>Sarcothalia crispata</i> <i>Sarcopeltis skottsbergii</i>	Cultivos comerciales desde 1980 en centros de cultivo del sur del país, actualmente se distribuyen desde la zona norte hasta Región de Los Lagos. Producciones esporádicas.	www.semapesca.cl	Uso de las algas por comunidades costeras data de hace 14 000 años. Acuicultura de algas artesanal, extensiva, y monoespecífica, 84 % personas naturales no asociadas. 71 % de acuicultores de pequeña escala inscritos (784/1 089) son pescadores artesanales, y el 2,3 % de los pescadores artesanales (2 084/89 697) tiene iniciación de actividades comerciales. La vinculación entre acuicultura de pequeña escala (APE) y pesca artesanal, dificulta el acceso al financiamiento bancario, 11 % de organizaciones de pescadores artesanales ha tenido acceso al crédito formal por su baja formalización ante el Servicio de Impuestos Internos (SII).	Dillehay et al., 2008 FIPA, 2019; INE, 2012	Mayo de 2023 se registraron 939 titulares de centros de cultivos, de los cuales 20 % son mujeres. En el Perú y Chile, las mujeres están dedicadas a las actividades de transformación y comercialización. Las mujeres están conectadas con innovaciones centradas en producción de: harina de algas con marca de denominación de origen; fertilizante para actividades agrícolas locales; cosméticos; productos gastronómicos de algas y repostería local.	Avila et al., 2021 Godoy et al., 2016 Gallardo-Fernández et al., 2024; Valenzuela-Valenzuela, Rivera-Corvalán y Cartes-Velásquez, 2020.
ARGENTINA	<i>Gracilaria</i> sp. <i>Macrocystis pyrifera</i>	Zona sur en Patagonia argentina, no hubo desarrollo. Proyecto Patagonia Azul en costa de la provincia de Chubut, en granjas marinas regenerativas.	Empresa Soriano S.A. ONG.				

FIGURA 4
Mapa con la distribución de las principales especies de cultivo de macroalgas a pequeña escala en América Latina



Nota: Consulte el descarga de responsabilidad en la página de derechos de autor para conocer los nombres y límites utilizados en este mapa.

Fuente: Adaptado de Charted Territory Basemap (2024). Esri, TomTom, Garmin, FAO, NOAA, USGS, ©OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community. Disponible en: <https://hub.arcgis.com/maps/esri::charted-territory-map/about>

CUADRO 2
Resumen de los principales aspectos de territorio, sociales y de género en América Latina y el Caribe, revisados en esta sistematización

País	Especie o recurso cultivado	Territorio y permisos	Social	Género
México				
Belice				
Panamá				
Venezuela (República Bolivariana de)				
Colombia				
Brasil				
Perú				
Chile				
Argentina				

Con información publicada

Con registros informales

Sin registro

RECOMENDACIONES

La acuicultura de algas se presenta como una alternativa viable a corto plazo para satisfacer el creciente aumento en la demanda de alimentos, garantizando la seguridad alimentaria junto con otros recursos marinos. Además, su aplicación se extiende a diversos sectores, como la industria farmacéutica, energética y agropecuaria. Por ello, se recomienda lo siguiente, desde las diferentes perspectivas sistematizadas:

Perspectiva del territorio

- Fomentar la formalización en el sector pesquero y acuícola con un enfoque de igualdad de género, poniendo énfasis en la protección social, la salud, la estabilidad familiar y el trabajo digno, así como en políticas de cumplimiento de derechos laborales e incentivos.
- Mejorar la sostenibilidad ambiental de la acuicultura a través de un enfoque planificado y participativo, impulsando el desarrollo de infraestructuras adaptadas a los efectos del cambio climático, con el respaldo de la comunidad.
- Fortalecer mecanismos de monitoreo ambiental local, con el objetivo de hacer un mejor manejo y conservación de los ecosistemas, reducir la contaminación y proteger la biodiversidad.
- Incentivar con programas contextualizados y participativos la transformación digital mediante una infraestructura de TIC (Tecnologías de la Información y la Comunicación) adecuada y fomentar la alfabetización digital acorde a las realidades territoriales.
- Fortalecer las redes comerciales dentro de la región, facilitando que la demanda de productos acuícolas sea cubierta con productos locales, promoviendo su valor con sellos de origen regional.

Perspectiva social y cultural

- Promover políticas públicas e instrumentos de gestión que permitan el crecimiento sostenible y responsable de la actividad, en concordancia con las realidades locales y garantizando una participación equitativa.
- Fomentar la formalización en el sector pesquero y acuicultura con un enfoque de igualdad de género, poniendo énfasis en la protección social, la salud, la estabilidad familiar y el trabajo digno, así como en la implementación de políticas de cumplimiento de derechos laborales e incentivos.
- Recopilar y sistematizar buenas prácticas y experiencias en la acuicultura de pequeña escala de algas en comunidades costeras y continentales en América Latina, para generar material de apoyo en la difusión, educación e intercambio entre organizaciones locales y la comunidad en general. Esto permitirá empoderar a jóvenes y líderes locales en la promoción y desarrollo de una acuicultura azul y sostenible.

Perspectiva de género

- Mejorar el registro de información sobre la actividad segregada por sexo, con el fin de identificar necesidades a nivel local y regional y proyectar medidas de mejora.
- Diseñar e implementar programas de alfabetización, aprendizaje permanente y desarrollo de competencias, en colaboración con comunidades, organizaciones de empleadores, gobiernos locales y sociedad civil. Estos programas deben basarse en metodologías con enfoque de género para anticipar la futura demanda de competencias en el mercado laboral, en especial frente a la transformación tecnológica y una transición justa. Asimismo, deben facilitar el intercambio de buenas prácticas en la profesionalización, el perfeccionamiento de competencias y la readaptación profesional.

REFERENCIAS

- Andrade, H.M., Rosa, L.P., Souza, F.E., Silva, N.F., Cabral, M.C. y Teixeira, D.I. 2020. Seaweed production potential in the Brazilian northeast: A Study on the eastern coast of the State of Rio Grande do Norte, RN, Brazil. *Sustainability*, 12(3): 780. <https://doi.org/10.3390/su12030780>
- Andrade, P.B., Barbosa, M., Matos, R., Lopes, G., Vinholes, J., Mouga, T. y Valentão, P. 2013. Valuable compounds in macroalgae extracts. *Food Chemistry*, 138(2–3): 1819–1828. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.11.081>
- Álvarez, M.C., Stuardo Ruiz, G., Collao Navia, D. y Gajardo Cortes, C. 2017. La visualización femenina en la pesca artesanal: transformaciones culturales en el sur de Chile. *Polis (Santiago)*, 16(46): 175–191. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-65682017000100175>
- Álvarez, M.C. 2020. “No queremos ser pesca acompañante, sino pesca objetivo”. *Interfaces socio estatales sobre enfoque de género en la pesca artesanal en Chile*. Runa /41.2 octubre-abril. <https://doi.org/10.34096/runa.v41i2.8691>
- Arbaiza, S., Gil-Kodaka, P., Arakaki, N. y Alveal, K. 2019. Primeros estadios de cultivo a partir de carpósporas de *Chondracanthus chamissoi* de tres localidades de la costa peruana. *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.*, 54: 198–207. <https://doi.org/10.22370/rbmo.2019.54.2.1901>
- Arbaiza, S., Gil-Kodaka, R.P., Merino, L., Ramírez, P., Rivera, H., Villena, G. y Zenón, J. 2021. *Diversificación acuícola hacia el cultivo de macroalgas*. Guía técnica. Proyecto Aquipesca Perú. InterGraphic Center, 119 p. <https://cetmar.org/wp-content/uploads/2021/07/DiversificacionAcuicolaMacroalgas.pdf>
- Araos, F., Borie, C., Romo, M. y Lira, N. 2018. Algas: Breves antecedentes etnográficos y arqueológicos. *Fogón. Revista internacional de estudio de las tradiciones*, 1(2): 40–52. https://www.researchgate.net/publication/332428268_Algas_Breves_antecedentes_etnograficos_y_arqueologicos
- Avila, M., Gallardo, G., Godoy, C. y Matamala, M. 2021. *Diagnóstico sobre el rol de las mujeres en la pesca y acuicultura artesanal en Chile. Informe Final*. Environmental Defense Fund (EDF) 51 pp.
- Avila, M., Aroca, G., Rodríguez, D., Riquelme, R., Piel, M.I. y De Zarate, C. 2019. Manual de Buenas Prácticas para el cultivo del Pelillo (*Agarophyton chilensis*). *Serie programa educativo para la Pesca Artesanal. VI. Manual de buenas prácticas para el pelillo*. 48 pp. ISBN 978-956-302-112-7. https://www.sernapesca.cl/app/uploads/2023/11/manual_buenas_practicas_del_cultivo_de_pelillo.pdf
- Avila, M., Aroca, G., Riquelme, R., Rodríguez D. y Grünewald, A. 2018. Manual cultivo del alga comestible: chasca o chicoria de mar *Chondracanthus chamissoi*. *Serie Programa Educativo Participativo para la Pesca Artesanal. V Cultivo de chasca-chicoria de mar*. 30 pp. ISBN 978-956-302-105-9.
- Avila, M., Merino, C., Piel, M.I., Riquelme, R., Guissen, K., Pizarro, P. y Rojas, A. 2017. Manual para el cultivo y repoblamiento del huiro Negro (*Lessonia berteroana*). *Serie Programa educativo Participativo para la Pesca Artesanal. IV Cultivo y repoblamiento de Huiro negro*. 47 pp. ISBN 978-956-302-104-2. <https://sembrandoelmar.cl/web/wp-content/uploads/2021/02/Manual-Huiro-Negro.pdf>
- Avila-Peltroche, J. y Padilla-Vallejos, J. 2020. The seaweed resources of Peru. *Botánica Marina*, 63(4): 381–394. https://www.researchgate.net/publication/343471858_The_seaweed_resources_of_Peru
- Avila-Peltroche, J. y Villena-Sarmiento, G. 2022. Analysis of Peruvian seaweed exports during the period 1995–2020 using trade data. *Botánica Marina*, 65(3): 209–220. <https://doi.org/10.1515/bot-2022-0002>
- Batista de Vega, G. 2014. Uso y cultivo de macroalgas en Panamá. *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 1(1): 57–67. https://revistas.up.ac.pa/index.php/revista_colon_ctn/article/view/1808

- Bula-Meyer, G. y Norris, J.N. 2001. Notes on New Records of Red Algae from the Colombian Caribbean. *Botánica Marina*, 44(4): 351–360. <https://doi.org/10.1515/BOT.2001.045>
- Colegate, S.M. y Molyneux, R.J. 2008. *Bioactive Natural Products: Detection, Isolation, and Structural Determination*. 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton, xiii, 605 p.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2019 *Planificación para el desarrollo territorial sostenible en América Latina y el Caribe (LC/CRP.17/3)*, Santiago, 2019. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/382c3038-a88d-4f29-aaf7-5c08bb1b2faf/content>
- Comité Científico Asesor de Cambio Climático. 2021. *Documento de alcances: soluciones basadas en la naturaleza*, 154 pp. https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wpcontent/uploads/2021/08/Informe_SBN_v210406.pdf
- Díaz-Pulido, G. y Díaz-Ruiz, M. 2003. Diversidad de algas marinas bentónicas del Atlántico colombiano. *Biota Colombiana*, 4(2): 203–206. <https://revistas.humboldt.org.co/index.php/biota/article/view/134>
- Díaz-Pulido, G. y Garzón-Ferreira, J. 2002. Seasonality in algal assemblages on upwelling-influenced coral reefs in the Colombian Caribbean. *Botánica Marina*, 45: 284–29. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/BOT.2002.028/html>
- Díaz-Pulido, G. 2000. Vegetación marina de un sector de la plataforma continental de la guajira (Caribe Colombiana). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 29: 27–32. <http://boletin.invemar.org.co:8085/ojs/index.php/bole>
- Dillehay, T., Ramírez, C., Pino, M., Collins, M.B., Rossen, J. y Pino-Navarro, J.D. 2008. Monte Verde: Seaweed, Food, Medicine, and the Peopling of South America. *Science*, 320: 784–786. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1156533>
- Dillehay, T. 2004. *Monte Verde. Un Asentamiento Humano del Pleistoceno Tardío en el Sur de Chile*. Colección Serie Universitaria, LOM Ediciones, Universidad Austral de Chile, 2004, pp. 173, Santiago. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-73562005000200015>
- Espi-Alemañ, A.E., Robledo, D. y Hayashi, L. 2019. Development of seaweed cultivation in Latin America: current trends and prospects. *Phycologia*, 58(5): 462–471. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1640996>
- Espinosa-Antón, A., Hernández-Herrera, R. y González, M. 2021. Potencial de las macroalgas marinas como bioestimulantes en la producción agrícola de Cuba. *Ctro. Agr.*, 48(3): 81–92. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852021000300081
- FAO. 2016. *Promoting gender equality and women's empowerment in fisheries and aquaculture*. Rome. <http://www.fao.org/3/a-i6623e.pdf>
- FAO. 2021. *Comisión de Pesca en pequeña escala, artesanal y acuicultura para América Latina y El Caribe*. Décimo Séptima Reunión, Lima, Perú, 27–29 octubre 2021, 8 p. <https://www.fao.org/3/cb6953es/cb6953es.pdf>
- FAO. 2022a. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022. Hacia la transformación azul*. Roma. <https://doi.org/10.4060/cc0461es>
- FAO. 2022b. Las algas brindan nuevas oportunidades a los pescadores indígenas en Panamá. Roma. [Consultado el 12 marzo de 2025]. <https://www.fao.org/newsroom/story/Algae-offers-Indigenous-fishers-new-prospects-in-Panama/es>
- Flores, A. 2020. La mujer en el sector acuícola, avances y oportunidades. *Panorama Acuícola Magazine*, Noviembre-Diciembre 2020, Vol. 26, No. 1. https://issuu.com/designpublications/docs/unlisted_web_panorama_acuicola_26-1_noviembre_dici/s/11528841
- Freddi, A., y Aguilar-Manjarrez, J. 2003. Small-scale seaweed farming in North East Brazil. TCP/BRA/0065 35. *FAO Aquaculture Newsletter* 32.

- Gallardo-Fernández, G., Avila, M., Saunders, F., Riquelme, R., Rodriguez, D., Aroca, G., y Gutierrez, J. 2024. Prospects of equitable and sustainable seaweed aquaculture: a case study of changing gender and socio-economic relations in Maullin, Chile. *Maritime studies*, 23:7. <https://doi.org/10.1007/s40152-024-00350-8>
- Godínez-Ortega, J. 2008. Colectores de algas de México (1787–1954). *Acta Botánica Mexicana*, 85: 75–97. https://www.researchgate.net/publication/26594481_Colectores_de_algas_de_Mexico_1787-1954
- Godoy, C., Mojica, H., Ríos, V. y Mendoza, D. 2016. *El rol de la mujer en la pesca y la acuicultura en Chile, Colombia, Paraguay y Perú. Integración, sistematización y análisis de estudios nacionales*. Oficina Regional para América Latina y el Caribe Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Santiago de Chile, 38 pp. <http://www.fao.org/3/a-i5731s.pdf>
- Hayashi, L., Bulboa, C., Kradolfer, P., Soriano, G. y Rebolledo, D. 2014. Cultivation of red seaweeds: a Latin American perspective. *J. Appl. Phycol.*, 26: 719–727. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0143-z>
- HLPE (High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition). 2014. *Extract from the Report Food losses and waste in the context of sustainable food systems. Summary and Recommendations*, 9 pp. https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/hlpe/hlpe_documents/HLPE_S_and_R/HLPE_2014_Food_Losses_and_Waste_Summary_EN.pdf
- Hurtado A.Q., Neish, I.C. y Critchley, A.T. 2019. Phyconomy: the extensive cultivation of seaweeds, their sustainability and economic value, with particular reference to important lessons to be learned and transferred from the practice of eucheumatoid farming. *Phycologia*, 58: 472–483. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1625632>
- INE (Instituto Nacional de Estadísticas, Chile). 2012. *Estadísticas vitales. Informe Anual*, 2010, 544 pp. https://www.ine.gob.cl/docs/default-source/nacimientos-matrimonios-y-defunciones/publicaciones-y-anuarios/anuarios-de-estad%C3%ADsticas-vitales/ine_anual
- Marinho-Soriano, E., Fonseca, P.C., Carneiro, M.A. y Moreira, W.S. 2006. Seasonal variation in the chemical composition of two tropical seaweeds. *Bioresour Technol.*, 97(18): 2402–6. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.10.014>
- Marquet, P.A. 2022. *Las tres brechas del desarrollo sostenible y el cierre de la brecha ambiental en Chile: oportunidades para una recuperación postpandemia más sostenible y con bajas emisiones de carbono en América Latina y el Caribe*. Documentos de Proyectos (LC/TS.2022/35), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). <https://www.cepal.org/es/publicaciones/47883-tres-brechas-desarrollo-sostenible-cierre-la-brecha-ambiental-chile>
- McChesney, J., Sylesh, K. y Venkataraman, J.T. 2007. Plant natural products: Back to the future or into extinction? *Phytochemistry*, 68(14): 2015–2022. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2007.04.032>
- Mendoza, L. 2024. Mujeres del mar: Creando olas de cambio. En: *Naciones Unidas*. Perú. [Consultado el 12 marzo de 2025]. <https://peru.un.org/es/262635-mujeres-del-mar-creando-olas-de-cambio>
- Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. 2016. *LEY 20.925. Crea bonificación para el repoblamiento y cultivo de algas*. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1091690&idVersion=2020-09-08>
- Mohamed, S., Hashim, S.N. y Rahman, H.A. 2012. Seaweeds: A sustainable functional food for complementary and alternative therapy. *Trends in Food Science and Technology*, 23(2), 83–96. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.09.001>
- Naylor, R.L., Hardy, R.W., Buschmann, A.H., Busch, S.R., Cao, L., Klinger, D.H., Little, D.C., Lubchenco, J., Shumway, S.E. y Troel, M. 2021. A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature*, 591: 551–563. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03308-6>

- Núñez, R., Garateix, A. Laguna, A., Fernández, M., Ortiz, E., Llanio, M., Valdés, O., Rodríguez, A. y Menéndez, R. 2006. Caribbean marine biodiversity as a source of new compounds of biomedical interest and others industrial applications. *Pharmacologyonline*, 3: 111–119. <http://hdl.handle.net/1834/3649>
- OESA (Observatorio Español de Acuicultura). 2007. *Brasil: Comunidad desarrolla extractivismo sustentable y ecológico de algas*. [Consultado el 12 marzo de 2025]. <https://www.observatorio-acuicultura.es/comunicacion/actualidad/brasil-comunidad-desarrolla-extractivismo-sustentable-y-ecologico-de-algas>
- OIT (Organización Internacional del Trabajo). 2021a. *El futuro del trabajo en la acuicultura en el contexto de la economía rural, documento de referencia para su discusión en la Reunión técnica sobre el futuro del trabajo en la acuicultura en el contexto de la economía rural (Ginebra, 2021)*. Oficina Internacional del Trabajo, Departamento de Políticas Sectoriales, Ginebra. https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_dialogue/---sector/docum
- OIT. 2021b. *Reunión técnica sobre el futuro del trabajo en la acuicultura en el contexto de la economía rural Ginebra (reunión con formato híbrido), 13–17 de diciembre de 2021. Conclusiones sobre el futuro del trabajo en la acuicultura en el contexto de la economía rural*. https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@ed_dialogue/@sector/documents/meetingdocument/wcms_832492.pdf
- Peng, Y., Hu, J., Yang, B., Lin, P.X., Zhou, F.X., Yang, W. X. y Liu, Y. 2015. *Chemical composition of seaweeds*. En: *Seaweed Sustainability: Food and Non-Food Applications*. Brijesh K. Tiwari, Declan J. Troy (eds.). Academic Press. 79–124 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-418697-2.00005-2>
- Radulovich, R. 2008. Maricultura: la nueva agricultura. *La Nación*, 27-4-08. https://www.researchgate.net/publication/277008937_Maricultura_a_mar_abierto_en_Costa_Rica
- Radulovich, R., Umazor, S. y Cabrera, R. 2013. *Algas Tropicales: Cultivo y uso como alimento*. Ed. Universidad de Costa Rica, San José. 52 pp. https://www.researchgate.net/publication/272168650_Algas_Tropicales_Cultivo_y_Uso_como_Alimento_2013_Tropical_Seaweeds_Cultivation_and_Use_as_Food
- Rebours, C., Marinho-Soriano, E., Zertuche-González, J.A., Hayashi, L., Vásquez, J.A., Kradolfer, P., Soriano, G., et al. 2014. *Seaweeds: an opportunity for wealth and sustainable livelihood for coastal communities*. *J Appl Phycol*, 26: 1939–1951. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0304-8>
- Reis, R.P., Castelar, B. y Dos Santos, A. 2017. Why is algaculture still incipient in Brazil? *J Appl. Phycol*, 29: 673–682. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0890-8>
- Robaina, R., García, P. y Batista de Vega, G. 2008. *Cultivo ecosostenible de algas marinas (Seaweed Ecofriendly Aquaculture. SEA Panamá)*. Memoria PCI C5054/06 Manuales de laboratorio. <http://hdl.handle.net/10553/1963>
- Robledo, D., Gasca-Leyva, E. y Fraga, J. 2013. *Social and economic dimensions of carrageenan seaweed farming in Mexico*. In D. Valderrama, J. Cai, N. Hishamunda y N. Ridler (eds.). *Social and economic dimensions of carrageenan seaweed farming*, pp. 181–199. Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 580. Rome. https://www.researchgate.net/publication/243540334_Social_and_economic_dimensions_of_carrageenan_seaweed_farming_in_Mexico
- Rozo, G. 2019. *Algas del Caribe Colombiano: Fuente alternativa de alimentos, nutracéuticos y biomateriales*. Tesis para el grado de MSc. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería Doctorado en Ciencias del Mar Bogotá, 113 pp. <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitstream/handle/20.500.12010/8510/Trabajo%20%20de%20%20grado.pdf?sequence=3&isAllowed>

- Saavedra, S., Henríquez, L., Leal, P., Galleguillos, F., Cook, S. y Cárcamo, F. 2019. *Cultivo de Macroalgas: Diversificación de la Acuicultura de Pequeña Escala en Chile*. Convenio de Desempeño, Subsecretaría de Economía y Empresas de Menor Tamaño. Instituto de Fomento Pesquero. 106 pp. https://www.ifop.cl/wp-content/contenidos/uploads/biblioteca/libros_digitales/cultivo_de_macroalgas.pdf
- Sánchez-Roncancio, C. y Puentes, V. 2024. La pesca en pequeña escala de Colombia: un enfoque de género al desarrollo. *Ciencia Pesquera*, 32(núm. esp.): 15–31. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/905795/Ciencia_pesquera_32_especial.pdf
- Sanchiz, A. 2024. El despertar de una industria inactiva de la economía azul: La maricultura de algas en Belice. En: *BID Mejorando Vidas*. Belice. [Consultado el 12 de marzo de 2025]. <https://blogs.iadb.org/innovacion/es/el-despertar-de-una-industria-inactiva-de-la-economia-azul-la-maricultura-de-algas-en-belice/>
- Santos, A. y Hayashi, L. 2022. Dados estadísticos da producao da macroalga *Kappaphycus alvarezii* em Santa Catarina, SAFRA 2021/2022. <https://publicacoes.epagri.sc.gov.br/>
- SERNAPESCA (Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura). 2019. Mujeres y hombres en el Sector Pesquero y Acuicultor de Chile. 2023, Edición N° 13, 48 pp. https://www.sernapesca.cl/app/uploads/2023/10/3.1_mujeres_y_hombres_en_el_sector_pesquero_y_acuicultor_2019.pdf
- SERNAPESCA. 2023. Mujeres y hombres en el Sector Pesquero y Acuicultor de Chile 2023, Edición N° 17, 72 pp. <https://www.sernapesca.cl/app/uploads/2024/03/Mujeres-y-Hombres-en-el-sector-pesq-y-acui-2023.pdf>
- Suarez, A., Martines-Danaras, B. y Alfonso, Y. 2015. *Macroalgas marina en Cuba*. 264 pp. Editorial UH, La Habana, Cuba. https://www.researchgate.net/publication/282110143_Macroalgas_marinas_de_Cuba
- SUBPESCA (Subsecretaria de Pesca y Acuicultura). 2023. *Informe sectorial de pesca y acuicultura. Departamento análisis sectorial*. 21 pp. https://www.subpesca.cl/portal/618/articles-119067_documento.pdf
- Tambutti, M. y Gómez, J.J. 2022. *Panorama de los océanos, los mares y los recursos marinos en América Latina y el Caribe: conservación, desarrollo sostenible y mitigación del cambio climático*. Documentos de Proyectos (LC/TS.2020/167/Rev.1), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). <https://hdl.handle.net/11362/47737>
- UCV (Universidad Católica de Valparaíso). 2019. *Actualización del diagnóstico socio económico de la acuicultura de pequeña escala en Chile*. Informe Final, Proyecto FIPA 2019-07. <https://www.subpesca.cl/fipa/613/w3-article-116514.html>
- Vaccaro, G. 2023. *Catalizando la implementación de un programa de acción estratégico para la gestión sostenible de los recursos marinos vivos compartidos en el sistema de la corriente de Humboldt1. Producto 3: Informe final del Diagnóstico de Género, el cual incluye los insumos y recomendaciones para actualizar el plan de género actual del proyecto Humboldt II*. Lima, Perú, 84 p. <https://proyectohumboldt2.org/wp-content/uploads/2023/06/PRODUCTO-FINAL-DIAGNOSTICO-DE-GENERO-GVACCARO-2.pdf>
- Valenzuela-Valenzuela, A., Rivera-Corvalán, B. y Cartes-Velásquez, R. 2020. Cremas y jabones de Alga & Mar: Un caso de innovación post27F. *Revista interamericana de ambiente y turismo*, 16(2): 116–127. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-235X2020000200116>
- Vásquez, B. 2014. La mujer en la acuicultura. *El Cotidiano*, 188: 111–112. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco Distrito Federal, México. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=32532787010>
- Westermeier, R., Patiño, D., Piel, M.I. y Müller, D. 2005. *Manual de cultivo de alga parda *Macrocystis pyrifera* (huido), Chile*. Proyecto FONDEF D00I1144. Universidad Austral de Chile. 38pp. https://sembrandoelmar.cl/web/wp-content/uploads/2021/02/manual_cultivo_pardas_UArturo_Pratt.pdf

- Wurmann, G.C.** 2017. *Regional review on status and trends in aquaculture development in Latin America and the Caribbean-2015*. FAO fisheries and aquaculture circular no. 1153/3, Rome, Italy. 36 pp. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/2c58bdbf-d330-451e-a8bd-004c2f60576b/content>
- Wurmann, C., Soto, D. y Norambuena, R.** 2022. *Regional review on status and trends in aquaculture development in Latin America and the Caribbean – 2020*. FAO Fisheries and Aquaculture Circular No.1232/3. Rome, FAO. <https://openknowledge.fao.org/items/88819b7c-cdba-43e7-a5c9-a5116834bc72>
- Zertuche-González, J.** 1993. *Situación actual del cultivo de algas agarófitas en América Latina y el Caribe*. Documento de Campo N° 13, Programa Cooperativo Gubernamental – Proyecto AQUILA II FAO-ITALIA.GCP/RLA/102/ITA. https://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2011/aq-moya_j/pdfAmont/aq-moya_j.pdf

Desafíos y oportunidades económicas para fortalecer la producción de algas marinas en América Latina y el Caribe

Valenti, W.C.¹, Felipe P.A. Cohen² y Patricia Moraes-Valenti¹

¹ Universidad Estatal de Sao Paulo, Brasil

² Urban Sea Co, São Paulo, Brazil

Valenti, W.C., Cohen, F.P.A. y Moraes-Valenti, P. 2025. *Desafíos y oportunidades económicas para fortalecer la producción de algas marinas en América Latina y el Caribe*. En: Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Murúa Andrade, P. y Farías Molina, A. (coords.). Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 24-26 de junio de 2024, Puerto Varas, Chile. FAO Actas de Pesca y Acuicultura. N.º 74. Roma, FAO. pp. 123-145.

RESUMEN

La sostenibilidad económica del cultivo de macroalgas en América Latina y el Caribe depende de dos factores clave: proyectos bien planificados y rentables, y una cadena de producción sólida que genere ingresos suficientes para mantener el compromiso de los acuicultores. Esta conclusión se desprende de la revisión de diversos artículos publicados sobre el tema. Nuestro análisis incluye una descripción detallada de la cadena productiva del cultivo de macroalgas en América Latina y el Caribe. En dicha cadena, la producción y los suministros constituyen vínculos sólidos, mientras que la transferencia de tecnología, los servicios de extensión, la capacitación laboral y el comercio presentan debilidades. En comparación con otros sectores acuícolas, este cultivo requiere inversiones y costos operativos más bajos. Sin embargo, al tratarse de una actividad con alta demanda de mano de obra, los costos representan el principal gasto operativo, seguidos por las plántulas y los gastos administrativos. La rentabilidad depende de la productividad y del precio de venta, que suele ser bajo en el mercado de materias primas para la industria de los ficocoloides. Los estudios disponibles muestran que la mayoría de las explotaciones no son rentables cuando los acuicultores se centran exclusivamente en la producción de ficocoloides. Sin embargo, la rentabilidad mejora considerablemente cuando los acuicultores introducen una matriz vertical mediante la incorporación de eslabones de la cadena de valor aguas abajo, como el procesamiento, la distribución y la comercialización. Esta integración vertical permite que incluso las pequeñas explotaciones sean económicamente viables y competitivas. Las oportunidades incluyen planes gubernamentales para impulsar la bioeconomía y avanzar hacia el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), así como programas de organizaciones no gubernamentales (ONG) orientados a la producción limpia. Las nuevas estrategias para fomentar el cultivo de algas en América Latina y el Caribe se centran en explorar cadenas de valor cortas y en el desarrollo de mercados emergentes, entre ellos la alimentación vegetariana y vegana, los bioestimulantes agrícolas, los nutracéuticos y cosmeceúticos. La competencia con los grandes productores asiáticos constituye un riesgo importante que debe tenerse en cuenta ante un posible crecimiento sustancial de los mercados internos.

INTRODUCCIÓN

El cultivo comercial de algas es aún incipiente en América Latina y el Caribe. Solo el Brasil, Chile, México y la República Bolivariana de Venezuela han desarrollado de forma significativa alguna modalidad de acuicultura comercial. El principal actor es Chile, que produjo 13 406 toneladas de *Gracilaria chilensis* (previamente *Agarophyton chilensis*) y 11 toneladas de *Macrocystis pyrifera* en 2022 (SERNAPESCA, 2024). La República Bolivariana de Venezuela ocupa el segundo lugar, con una producción de aproximadamente 700 toneladas de *Kappaphycus alvarezii* en 2023 (Rincones, Campos y Narvaéz, 2024). El Brasil se sitúa en tercer lugar, con una producción aproximada de 1 000 toneladas de *K. alvarezii* (datos sin publicar) y cerca de 5 toneladas de *Hypnea pseudomusciformis* (F.N. Costa, comunicación personal, 2024) en 2023. México ocupa el cuarto lugar, con 100 toneladas de *Ulva ohnoi* en 2023 (J.A. Zertuche- González, comunicación personal, 2024).

Otros países como Belice, el Ecuador, Santa Lucía y Granada figuran en las estadísticas de la FAO con menos de 100 toneladas/año de *K. alvarezii* in 2019 (Cai *et al.*, 2021). Chile cuenta con cientos de explotaciones y exporta parte de su producción a países desarrollados para la extracción del ficocoloide agar (Zuniga-Jara y Conteras, 2020). La República Bolivariana de Venezuela tiene alrededor de 350 acuicultores que producen materia prima para exportar a industrias dedicadas a la extracción de carragenina. El Brasil cuenta con aproximadamente 50 pequeñas fincas acuícolas, cuya producción se comercializa en el mercado interno para consumo humano, bioestimulantes y cosmeceúticos. Todas las fincas siguen un modelo de producción artesanal (Valenti *et al.*, 2021). En México, la producción está concentrada en una sola empresa que exporta el 99 % de su producción a los Estados Unidos de América en forma de polvo o copos de alta calidad.

La sostenibilidad económica es la dimensión primordial de la acuicultura sostenible, ya que los productores necesitan generar riqueza para mejorar la sostenibilidad medioambiental y social. La sostenibilidad económica de la acuicultura depende de proyectos bien planificados y rentables, así como de una cadena de producción que genere ingresos suficientes para mantener a los productores comprometidos con la actividad (Valenti y Moraes-Valenti, 2010). Por lo tanto, para que el cultivo de algas sea rentable y sostenible, es fundamental que la producción y el rendimiento económico de la explotación sean elevados y constantes. Sin embargo, esto solo puede lograrse cuando las fincas acuícolas forman parte de una cadena de producción sólida y resiliente, que puede incluir diferentes cadenas de valor. El desarrollo de cadenas de valor innovadoras que abran nuevos mercados es crucial para la expansión del cultivo de algas marinas y para responder a las necesidades del mercado (FAO, 2022; Banco Mundial, 2023). Esto implica una investigación exhaustiva para comprender la estructura y la dinámica de la cadena de producción, lo cual permitirá una gestión eficiente, una toma de decisiones informada y el desarrollo de fincas de cultivo de algas marinas rentables y resilientes.

A pesar del papel fundamental del conocimiento económico en el cultivo de algas marinas, existe una notable escasez de estudios que evalúen el desempeño económico de esta industria en América Latina y el Caribe. Aunque se han realizado algunos estudios (por ejemplo, Camus, Infante y Buschmann, 2019; Pereira, Kimpara y Valenti, 2020a; Zuniga-Jara, Soria-Barreto y Godoy-Alfaro, 2022; Montúfar-Romero *et al.*, 2023), es necesaria una revisión exhaustiva de la literatura para recopilar todos los datos disponibles, identificar vacíos y establecer prioridades para futuras investigaciones. Por ello, se ha llevado a cabo una revisión de los trabajos publicados sobre los aspectos económicos del cultivo de algas en la región.

Se realizó una búsqueda en la base de datos Web of Science™ (<http://apps. webofknowledge.com/>) en marzo del 2024. Nos centramos en la selección de artículos que ofrecen un análisis económico de la acuicultura de algas marinas en América Latina y aquellos que aportan datos relevantes e información en su cadena de producción,

contexto histórico y antecedentes técnicos y productivos en la región. En primer lugar, se buscaron los términos “macroalga” o “alga” en el campo “Tema”; esta búsqueda arrojó 36 288 artículos.

A continuación, se filtraron por países de América Latina y el Caribe, obteniendo 4 143 artículos. A partir de estos, se refinaron tres búsquedas adicionales: (1) “análisis económico” (52 artículos), (2) “econom*” (336 artículos), y (3) “econom*” o “valor” o “valorización” (total de 596 artículos); refinando de nuevo por “acuicultura” o “cultura” o “cultivo” (152 artículos). Una vez obtenidos estos resultados, se examinó cada referencia individualmente para determinar si entraba en el ámbito de este estudio. De manera complementaria, también se incluyeron algunos artículos no listados en Web of Science™ pero citados en las referencias de los documentos previamente seleccionados. Además, se realizaron entrevistas con partes interesadas clave para recabar información específica no publicada.

Se seleccionaron un total de 55 artículos científicos, de los cuales 21 incluían algún tipo de análisis económico. De estos 21 artículos, 71 % evaluaba la producción de las siguientes especies de algas rojas: *K. alvarezii*, *Sarcopeltis skottsbergii* (previamente *Gigartina skottsbergii*), *Chondracantus chamissoi*, *G. chilensis*, *Eucheuma isiforme* and *H. pseudomusciformis*. El 29 % restante se centraba en la producción de algas marrones de las especies *M. pyrifera* y *Lessonia trabeculata*. *K. alvarezii* fue la especie más estudiada, con un 38 % de las publicaciones.

A partir de esta bibliografía y de testimonios personales, se ha sintetizado la información relativa a los aspectos económicos del cultivo de algas marinas en América Latina y el Caribe.

También se desarrolló una descripción detallada de la cadena de producción implicada, destacando los eslabones fuertes y débiles, así como las inversiones necesarias, los costes operativos y los indicadores de viabilidad para diferentes sistemas y especies. Asimismo, se analizan las posibilidades de mercado y de comercialización. Por último, se discuten las oportunidades de financiación y las nuevas estrategias para impulsar el cultivo de algas marinas.

CADENA DE PRODUCCIÓN, SUMINISTRO Y CADENAS DE VALOR DEL CULTIVO DE ALGAS MARINAS EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

La cadena de producción es un sistema complejo de elementos interconectados, que abarca el entorno general en el que opera la finca acuícola y todas las etapas necesarias para la producción, distribución y comercialización del producto hasta que llega al consumidor final. En lugar de un flujo lineal simple de productos y servicios, la cadena de producción constituye un entramado de agentes con efectos sinérgicos. Esta complejidad e interdependencia pone de relieve la necesidad de una comprensión profunda de la cadena de producción por parte de los científicos, responsables políticos, técnicos de extensión y productores. Este entendimiento es esencial para establecer una gobernanza adecuada y eficiente que incluya a todos los actores y permita consolidar una industria acuícola sólida (Valenti y Moraes-Valenti, 2010).

La solidez de una industria depende de la fortaleza del eslabón más débil de la cadena de producción (Levine, 2012). A pesar de ello, los estudios sobre las cadenas de producción de la acuicultura han sido escasos. De hecho, científicos, responsables políticos y otras partes interesadas han descuidado la importancia de la cadena de producción de algas marinas en la región. Los esfuerzos de investigadores, gobiernos y agricultores se concentran generalmente en el desarrollo y la difusión de tecnologías de producción, sin tener en cuenta si esta tecnología constituye realmente el principal factor limitante para el éxito del sector.

Los actores que participan en todos los eslabones de la cadena de producción de algas deben comprender que su éxito financiero depende del buen funcionamiento de toda la cadena. Por tanto, resulta esencial fortalecer las capacidades en materia

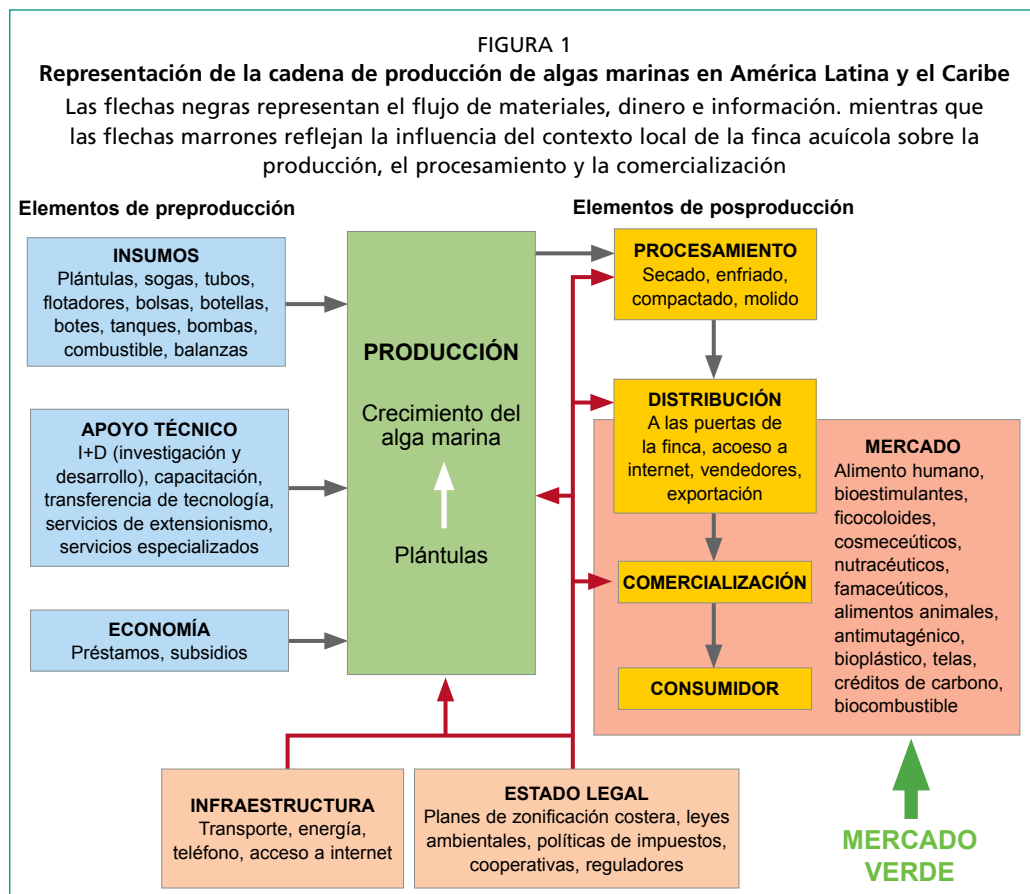
de producción, suministro y cadenas de valor entre investigadores económicos, técnicos, responsables políticos y agricultores. El conocimiento de cada componente de la cadena de producción es esencial para construir una acuicultura de algas marinas exitosa y duradera. Por ello, en esta sección se definen los conceptos generales y los parámetros clave de todos los elementos de la cadena de producción de algas marinas en América Latina y el Caribe.

La Figura 1 muestra los elementos esenciales de la cadena de producción de algas marinas en América Latina y el Caribe. En el centro se encuentran los procesos de producción de algas en las fincas, junto con la infraestructura y el marco legal. Además, la producción depende de los elementos de preproducción y posproducción. Los primeros se agrupan en insumos, apoyo técnico y escenarios económicos.

La cadena de producción incluye las cadenas de suministro y de valor de los materiales suministrados a las fincas de cultivo de algas marinas, así como de estos productos hacia los consumidores. Ambas cadenas tienen un carácter lineal, en el que el producto avanza paso a paso de una etapa a la siguiente. La cadena de suministro se define como el conjunto de empresas a través de las cuales un producto o servicio se desplaza desde el productor al consumidor final, mientras que la cadena de valor comprende el conjunto de funciones del mercado desempeñadas por las empresas dentro de esa cadena de suministro (Engle, 2019).

Las cadenas de suministro describen los caminos del producto hasta el consumidor, haciendo hincapié en el flujo de materiales y bienes. Las cadenas de valor, por su parte, muestran cómo un producto o servicio incrementa su valor a medida que transita por los distintos eslabones hasta llegar al consumidor final.

Este flujo global puede dividirse en flujo ascendente y descendente. El flujo ascendente se refiere a los insumos materiales necesarios para la producción, mientras que el flujo descendente comprende la producción y los elementos del canal de distribución de cada producto. El flujo ascendente incluye todos quienes proporcionan insumos para la



producción; en este caso, los consumidores son las propias fincas productoras. El flujo descendente abarca la finca en sí misma y los canales de distribución; que incluyen la cadena de empresas, negocios (o individuos) por las que pasa el producto hasta llegar al consumidor final.

Las empresas situadas entre la producción y el consumidor final son los intermediarios. Estos intermediarios pueden mejorar el producto, agregándole valor antes de revenderlo (cadena de valor), o simplemente encargarse de su traslado dentro de la cadena de suministro. La cadena de suministro posterior a la recolección puede incluir intermediarios, mayoristas o distribuidores, minoristas y concesionarios. Los minoristas incluyen vendedores en mercados, pescaderías, supermercados, restaurantes y otros. Los concesionarios no agregan valor al producto; simplemente lo compran o venden sin modificaciones, y representan el último eslabón en la distribución.

La mayoría de la bibliografía sobre la cadena de valor de productos del mar se ha centrado en las cadenas de valor a nivel mundial (Bush *et al.*, 2019). Los estudios específicos sobre América Latina y el Caribe son escasos, dado que el cultivo de algas marinas en la región es aún incipiente. Robledo, Gasca-Leyva y Fraga (2013) han abordado algunos aspectos de la cadena de valor de la carragenina en México, pero no se han identificado otros estudios relevantes.

Producción

El proceso de producción generalmente involucra dos fases: la obtención de plántulas y su crecimiento, que pueden llevarse a cabo en la misma finca o en diferentes ubicaciones. En América Latina y el Caribe, la mayor parte de la producción de plántulas se logra a través de la propagación vegetativa de algas marinas rojas del género *Gracilaria*, *Hypnea* y *Kappaphycus* (Alemán *et al.*, 2019; Pereira, Kimpara y Valenti, 2021). Esta propagación vegetativa se basa en la fragmentación del talo del alga marina de su lecho natural o a partir de restos del ciclo de reproducción anterior, lo que permite que el propio productor gestione ambas fases. Sin embargo, unos 30 productores en la región subtropical del Brasil, donde la fase de crecimiento se interrumpe durante el invierno, importan plántulas de *K. alvarezii* desde fincas tropicales situadas a unos 1 000 km de distancia.

A menudo, en América Latina y el Caribe, las plántulas de especies nativas se obtienen como fragmentos de algas marinas capturados en aguas naturales (Revilla-Lovano *et al.*, 2021; Pereira, Kimpara y Valenti, 2021), mientras que las plántulas de *K. alvarezii* suelen proceder de la última recolección o de otras fincas (Hayashi *et al.*, 2014; Gelli *et al.*, 2020; Montúfar-Romero *et al.*, 2023).

Las camas naturales de algas han sido explotadas intensamente para satisfacer la demanda de agar, carragenina y alimentos, causando un impacto significativo en las poblaciones naturales (Marinho-Soriano, 2017; Simioni, Hayashi y Oliveira, 2019; Camus and Hernández-González, 2019). Esta sobreexplotación ha generado riesgo de escasez de plántulas, por lo que la recolección de semillas en camas naturales resulta insostenible e insegura. Por ello, se ha promovido el cultivo de plántulas para reducir el impacto sobre los bancos naturales de algas y asegurar la provisión de semillas durante todo el año. En general, se recurre a la propagación vegetativa tradicional por fragmentación (Castro y Yokoya, 2019; Camus y Hernández-González, 2019). Las plántulas también se producen en instalaciones interiores mediante reproducción sexual *ex situ*, recolectando talos maduros de la naturaleza, seguidos de esporulación y desarrollo de esporas (Halling *et al.*, 2005; Camus, Infante y Buschmann, 2019). Este es el proceso usado para producir plántulas del quelpo chileno *M. pyrifera* y *L. trabeculata*, en el que la esporulación ocurre directamente sobre las sogas de los criaderos, seguida de una fase en viveros o semilleros (Hayashi, Cantarino y Critchley, 2020). También se utilizan criaderos interiores para incrementar la variabilidad genética de las algas marinas rojas.

Este es un cultivo monofásico, que normalmente se realiza en aguas costeras someras. Las plántulas se plantan directamente sobre camas de arena adheridas a cuerdas o se insertan en redes tubulares. En el caso del cultivo de *G. chilensis*, se utiliza con frecuencia el método de plantación en el fondo, que requiere herramientas manuales en aguas poco profundas o la intervención de buzos en zonas profundas (Avila *et al.*, 2019). Soto (2011) describió un método de siembra para *S. skottsbergii*, en el que se colocan talos reproductivos y maduros en redes de algodón con piedras en el lecho marino; las redes marinas se desintegran en pocos días, permitiendo que las esporas colonicen las rocas. Las sogas o redes tubulares suelen estar asociadas a hilos de nailon sumergidos, fijados al fondo o a balsas flotantes, con configuraciones de profundidad y diseño variables (Goes y Reis, 2011; Robledo, Gasca-Leyva y Fraga, 2013; Gelli *et al.*, 2020; Pereira, Kimpara y Valenti, 2020b; Zuniga-Jara, Soria-Barreto y Godoy-Alfaro, 2022; Montúfar-Romero, 2023). Estas estructuras se fijan al fondo marino a diferentes profundidades, según la corriente submarina, la transparencia del agua y la especie cultivada. Pueden estar fijadas con una cuerda suelta de forma que floten libremente o fijarse a profundidades específicas que pueden o no quedarse expuestas en la marea baja. Las balsas flotantes suelen fabricarse con tubos de PVC o bambú.

Para el cultivo de *Gracillaria* spp. y *K. alvarezzi* se suele utilizar una red adicional para proteger las algas de peces herbívoros y tortugas. La producción requiere de herramientas sencillas para recolectar fragmentos pequeños de algas marinas y sujetarlos en cuerdas, hilos o redes usando bandas elásticas o simplemente insertadas en cuerdas sin retorcer (Hayashi, Cantarino y Critchley, 2020).

Otros tipos de producción en América Latina y el Caribe incluye el cultivo en estanques en tierra, tanques internos y sistemas de cocultivo con moluscos y camarones. Una finca acuícola de alta productividad, establecida en México en 2019, cultiva *U. ohnoi* en estanques en tierra de 100 m² (Revilla-Lovano *et al.*, 2021). Esta finca ocupa 1 960 m², emplea a unas 20 personas y produce cerca de 100 toneladas anuales de algas marinas húmedas, que se venden a entre 35 y 45 USD/kilogramo en seco (J.A. Zertuche-González, comunicación personal, 2024).

En el Brasil, una empresa emergente cultiva algas marinas en instalaciones urbanas interiores, utilizando efluentes del cultivo de peces marinos ornamentales y un acuario público, con resultados prometedores (Cohen *et al.*, 2022). También se han realizado experiencias de cultivo de algas marinas con mejillones (Santos *et al.*, 2018; Yoshimura, Cunha y Oliveira, 2006; Silva, Castilho-Barros y Henriques, 2022) y con camarones, usando estanques, canales de entrada y de salida (Marinho-Soriano *et al.*, 2009; Henry-Silva *et al.*, 2023).

No se han identificado fincas productoras de algas marinas situadas a más de 3 millas náuticas de la costa en la región. El término “aguas afuera” (*offshore*) es controvertido y, a menudo, mal utilizado en el contexto de la acuicultura (Bak, Gregersen e Infante, 2020). En Chile, se han desarrollado experimentos precomerciales en zonas expuestas y profundas cercanas a la costa con *M. pyrifera* (Camus, Infante y Buschmann, 2018, 2019a; Bak, Gregersen e Infante, 2020) con resultados prometedores. Los elevados costos de anclaje y estructuras de sujeción constituyen la principal limitación.

Infraestructura y estado legal

La infraestructura, las leyes, las normas y los reglamentos son componentes cruciales que interactúan estrechamente con la producción y el comercio de algas marinas (Figura 1). También influyen en el acceso de los agricultores a los suministros, la tecnología, el crédito y las políticas públicas. Muchos de estos componentes están sujetos a medidas gubernamentales y a esfuerzos colectivos por parte de los productores. La infraestructura y el marco jurídico repercuten en toda la red, sin implicar necesariamente el movimiento físico de los materiales, dinero o información a lo largo de las cadenas de suministro y de valor.

La infraestructura necesaria incluye transporte, energía y acceso a teléfono e internet. La disponibilidad de estos recursos varía considerablemente entre los países de la región y también dentro de cada país. Carreteras en buen estado, redes ferroviarias o transporte fluvial son esenciales tanto para el abastecimiento de las fincas como para el traslado de la producción al mercado. Resulta ventajoso establecer explotaciones agrícolas cercanas a buenas vías de comunicación, aunque estas zonas suelen ser más costosas. La disponibilidad y el costo de la energía eléctrica pueden influir en la estrategia de producción. El uso de hornos secos, congeladores, molinos, trituradoras, exprimidoras y otros equipos requiere de energía eléctrica, cuyo costo es prohibitivo en algunas regiones. Las instalaciones a escala industrial utilizan maquinaria eléctrica de gran tamaño, mientras que las más pequeñas utilizan equipos manuales sencillos. La comunicación telefónica y el acceso a internet son a menudo deficientes o inexistentes en las zonas costeras rurales donde se cultivan algas marinas. Estas limitaciones restringen las oportunidades de comercialización de los productos. La logística para transportar los insumos a las explotaciones y para llevar la producción al mercado es, en muchos casos, deficiente, costosa y lenta en las zonas costeras rurales de América Latina y el Caribe.

Los requisitos legales incluyen planes de ordenación del espacio marino-costero, legislación ambiental, normativas, y el marco regulador de cooperativas y asociaciones de agricultores. Todos los proyectos deben planificarse de conformidad con la ocupación del espacio oceánico definida en la ley y la legislación ambiental y normativa. El nivel de restricción depende de la región y el país, y en ocasiones la normativa es ambigua, lo que dificulta la aplicación y genera conflictos y competencia por el espacio. Se han identificado regulaciones específicas para el cultivo de algas marinas en el Brasil (Alemañ *et al.*, 2019; Hayashi *et al.*, 2024), Chile (Camus y Hernández-González, 2019), el Ecuador (Motúfar-Romero *et al.*, 2023), el Perú y la República Bolivariana de Venezuela (Avila-Peltroche, 2024). Sin embargo, estas regulaciones aún no responden plenamente a las necesidades reales del sector.

Las políticas fiscales relacionadas con los insumos y el comercio de algas marinas varían entre los diferentes países de América Latina y el Caribe y pueden tener un impacto significativo en la rentabilidad del cultivo (Pereira, Kimpara y Valenti, 2020a). Las cooperativas y asociaciones de agricultores permiten generar economías de escala para las pequeñas fincas acuícolas. Estas organizaciones permiten compartir equipos, contratar profesionales y consultores especializados y aplicar estrategias de mercado coordinadas, entre otras ventajas. En el Brasil, los productores de algas marinas suelen formar parte de asociaciones de maricultura o de pescadores. La regulación comprende diversos permisos, licencias y reglamentos relacionados con la producción, la mano de obra y el mercado que deben ser cumplidas por la explotación. En la acuicultura, estos costes regulatorios pueden representar hasta el 25 % de los costos totales de producción (Engle, 2019).

Las normativas más restrictivas suelen estar vinculadas a la conservación del medio ambiente y al comercio de alimentos y productos farmacéuticos.

Elementos de preproducción

Las principales características de preproducción son los suministros, el apoyo técnico y el entorno económico (Figura 1). Las fincas acuícolas de algas marinas se instalan y operan utilizando equipos y materiales sencillos, disponibles en América Latina y el Caribe. Los criaderos y las granjas urbanas requieren instalaciones en tierra (incluidos costos de construcción y alquiler), tanques con sistemas de recirculación o de flujo continuo, tuberías de varios tamaños, acuarios, sistemas de filtración de agua, bombas de agua, luces artificiales, sopladores de aire, sensores para medir las variables del agua, hornos de secado, mesones de trabajo, balanza, sal marina artificial (o transporte de agua marina desde el océano), fertilizantes nitrogenados y fosfatados, y otros insumos

o medicamentos. Las fincas acuícolas costeras e interiores que operan en estanques requieren cuerdas, boyas o flotadores, cajas de distintos tamaños, tubos de PVC, combustible, cintas, bolsas de plástico y de papel, botellas de plástico y un cobertizo. Las explotaciones costeras también necesitan embarcaciones para el abastecimiento, mantenimiento y recolección de algas. Las granjas pueden producir sus propias plántulas o adquirirlas a proveedores externos (Figura 1).

El apoyo técnico abarca la generación continua, actualización o adaptación/importación de tecnología; la transferencia de nueva tecnología al sector productivo; capacitación del personal; la provisión de servicios de extensión y la asistencia técnica especializada. Los procedimientos para producir algas marinas se basan generalmente en tecnologías sencillas utilizadas en Asia (Rimmer *et al.*, 2021), adaptadas para su uso en América Latina y el Caribe en el caso de *K. alvarezzi* (Gelli *et al.*, 2020; Montúfar-Romero, 2023). Para las especies nativas, la tecnología ha sido desarrollada por instituciones locales de investigación (Camus, Infante y Buschmann, 2018; Camus, Infante y Buschmann, 2019), a veces con la participación de comunidades costeras tradicionales, como en el caso de *H. pseudomusciformis* (Pereira, Kimpara y Valenti, 2020b).

La mayoría de las especies nativas con potencial para la acuicultura requieren el desarrollo o mejora de tecnologías para alcanzar la viabilidad económica (Camus, Infante y Buschmann, 2019, 2019b; Arias-Echeverri *et al.*, 2022). Numerosas instituciones e investigadores en la región se han dedicado al estudio de las algas marinas (Camus, Infante y Buschmann, 2019, Camus y Hernández-González, 2019; Pereira, Kimpara y Valenti, 2020b; Arias-Echeverri *et al.*, 2022; Montúfar-Romero, 2023), aunque la mayoría se centra en investigación básica (Camus y Hernández-González, 2019; Arias-Echeverri *et al.*, 2022) y el nivel de preparación tecnológica (Technology Readiness Level, TRL, por sus siglas en inglés) se sitúa por debajo de 3. Los estudios económicos son todavía incipientes. Probablemente, solo el cultivo de *G. chilensis* en Chile y *H. pseudomusciformis* en el Brasil han alcanzado niveles TRL 8 o 9 (Avila *et al.*, 2019; Camus y Hernández-González, 2019; Pereira, Kimpara y Valenti, 2021).

El desarrollo tecnológico de las especies locales es, sin duda, el eslabón débil de la cadena de producción. La tecnología para la producción de *K. alvarezzi* ha sido importada y adaptada a las condiciones locales en el Brasil (Goes y Reis, 2011, 2012; Gelli *et al.*, 2020; Silva, Castilho-Barros y Henriques, 2022), el Ecuador (Montúfar-Romero, 2023), Santa Lucía, Granada, Belice, la República Bolivariana de Venezuela (Cai *et al.*, 2021) y otros países. Al menos en el Brasil, esta tecnología ha alcanzado un TRL 8. También se han desarrollado investigaciones para optimizar el cultivo de especies exóticas (Goes y Reis, 2011; 2012; Gelli *et al.*, 2020; Silva, Castilho-Barros y Henriques, 2022; Arias-Echeverri *et al.*, 2022; Montúfar-Romero, 2023). En el Brasil se han desarrollado y conservado en un biobanco doce cepas de *K. alvarezzi* (Gelli, Plastino y Yokoya, 2024).

Sin embargo, las universidades e institutos de investigación suelen ser eficientes en la generación de tecnología, pero menos eficaces en su transferencia. Esta tarea suele considerarse como una responsabilidad gubernamental. América Latina y el Caribe necesitan programas de investigación y desarrollo (I+D) impulsados por los gobiernos, para transformar el conocimiento básico en productos útiles y difundirlos entre los acuicultores potenciales.

La capacitación de la mano de obra y los servicios de extensión son fundamentales, ya que la acuicultura de algas marinas no es una actividad tradicional en América Latina y el Caribe. Esta carencia ha sido desatendida y constituye una de las principales razones del fracaso de muchas fincas acuícolas (Valenti y Moraes-Valenti, 2010). Cursos breves promovidos por agencias gubernamentales y universidades pueden contribuir a subsanar esa carencia. Sin embargo, los servicios de extensión gubernamentales rara vez prestan atención al sector de algas marinas y el personal de las agencias de extensión

carece de formación específica. En algunas regiones, los servicios privados de extensión son prestados por empresas interesadas en adquirir la producción. Aunque pueden ser eficaces, crean una fuerte dependencia de los acuicultores hacia estas compañías.

También se necesitan ciertos servicios especializados para la instalación y seguimiento de una finca acuícola, así como para análisis técnicos. Estos servicios incluyen consultorías para la prospección de nuevos lugares de cultivo, análisis de agua y la composición de las algas, y certificación taxonómica de las especies o cepas locales.

Las algas marinas pueden cambiar la composición de los metabolitos incluso en respuesta a pequeños cambios ambientales (Banco Mundial, 2023); por ello, es necesario que los laboratorios analíticos confirmen la composición de las algas comercializadas o de otros productos derivados como fertilizantes agrícolas, nutracéuticos, productos farmacéuticos y cosmeceúticos. Desafortunadamente, estos servicios no están disponibles, son ineficaces o caros en la región.

Poner en marcha una finca acuícola requiere una inversión inicial que, en algunos casos, puede recuperarse rápidamente. Aunque algunos productores utilizan sus fondos personales para empezar, la mayoría necesitan financiación externa. Las fuentes habituales son las organizaciones no gubernamentales (ONG) que se centran en proyectos sociales y sostenibles desde el punto de vista ambiental, los programas de préstamos gubernamentales y los bancos comerciales. Sin embargo, el cultivo de algas depende de muchas variables poco conocidas que añaden incertidumbres, lo que dificulta la predicción de riesgos (Camus, Infante y Buschmann, 2019; Alemañ *et al.*, 2019). Como consecuencia, no existen seguros para cubrir las pérdidas de producción, lo que representa una limitación importante para acceder a préstamos. Además, el cultivo de algas marinas es una actividad poco conocida para la mayoría de los bancos comerciales fuera de Asia, lo que reduce su disposición a conceder créditos a los productores. En algunos países como el Brasil y Chile (Camus y Hernández-González, 2019), existen programas gubernamentales específicos para financiar la agricultura y la acuicultura, que también pueden incluir el cultivo de algas marinas. En estos casos, los tipos de interés pueden ser bajos, lo que facilita el acceso en el marco de planes de desarrollo gubernamentales.

Elementos de posproducción

Los principales elementos de la posproducción se agrupan en el procesamiento, la distribución, el comercio, el consumidor final y la comercialización. Los tres últimos eslabones varían según los mercados (Figura 1). El consumidor final puede ser la población general en el caso de un plan de negocio de empresa a cliente (*business to consumer*, B2C, en inglés) o bien otra empresa en el caso de una estrategia entre empresas (*business to business*, B2B).

Para mantener la calidad de las algas, es fundamental una manipulación adecuada desde la finca hasta el consumidor. Al tratarse de un nuevo producto en América Latina y el Caribe, es esencial generar y mantener una percepción positiva entre los consumidores. Esta se construye a través del procesamiento y empaquetado, continúa a través de la distribución y almacenamiento apropiados y culmina en la exposición del producto en puntos de venta como tiendas, almacenes y supermercados hasta su consumo final. Una manipulación deficiente durante la cosecha, el procesamiento, la distribución o la venta minorista puede echar por tierra todos los esfuerzos previos.

El procesamiento posterior a la recolección varía en función del consumidor y del tipo de producto. Generalmente, las algas marinas producidas en fincas acuícolas de América Latina y el Caribe se procesan de forma tradicional, mediante el secado al sol, enfriamiento, escurrido o molienda. Este tipo de procesamiento es económico, eficiente y mucho más accesible que el de productos marinos como los mariscos. Las algas marinas suelen comercializarse secas, ya sea al sol o en horno, con un contenido de humedad del 10 al 35 %, y se destinan tanto al consumo humano como a la industria

FIGURA 2
Alimentos (en la foto, detrás) y cosméticos (delante)
producidos con *Kappaphycus alvarezii*

Estos productos proceden de una finca dedicada al cultivo de algas marinas y a un emprendimiento cosmeceútico. Ambos se comercializan directamente al consumidor final, lo que permite una cadena de valor corta, sin intermediarios, y se traduce en un aumento de los ingresos



©A.W. Valenti

de ficocoloides (Rincones y Tirado, 2011; Santos *et al.*, 2018; Pereira, Kimpara y Valenti, 2020a; Motúfar-Romero *et al.*, 2023). El producto seco es estable y tiene un año de caducidad. Las algas destinadas al consumo humano también pueden conservarse frescas, aunque a veces se emplea una cadena de frío. La capacitación de operadores es esencial para la obtención de un producto de buena calidad. En el caso de los bioestimulantes agrícolas, las algas se aplastan y se prensan para extraer un líquido concentrado

La distribución representa uno de los eslabones más débiles en la cadena de producción de algas marinas en América Latina y el Caribe. La entrega de algas frescas debe ser rápida y eficaz; generalmente, está disponible para consumidores cercanos a las fincas, como clientes directos del sector alimentario o industrias que elaboran extractos glicólicos o bioestimulantes.

La mayoría de las fincas procesan, envasan y distribuyen sus productos de forma artesanal (Figura 2), y los venden

directamente a minoristas como pescaderías, restaurantes, hoteles y supermercados, o al consumidor final en la propia finca o a través de internet.

Chile y México exportan biomasa como materia prima o producto procesado. Se ha planteado la posibilidad de sustituir la exportación de las algas colectadas para la extracción de ficocoloides por algas cultivadas. Sin embargo, esta transición depende de los costos de producción y del precio en el mercado internacional, que suele ser bajo y volátil (Valderrama *et al.*, 2015; Cai *et al.*, 2021; Banco Mundial, 2023). La exportación de productos procesados a países desarrollados, como los Estados Unidos de América, el Japón y la Unión Europea, exige productos de alta calidad, volúmenes importantes y un suministro continuo. En la mayoría de los casos, las algas procesadas en América Latina y el Caribe no cumplen todavía estos requisitos y se venden principalmente en el mercado nacional. Las excepciones son la producción de *G. chilensis* en Chile y *U. ohnoi* en México.

Mercado

El mercado de las algas marinas en América Latina y el Caribe puede dividirse en mercados de consumo humano y mercados industriales. Los primeros incluyen el consumo humano como alimento nutritivo o funcional, mientras que los segundos abarcan la extracción de carragenina, agar y alginatos, además de sectores industriales emergentes como fertilizantes y bioestimulantes agrícolas, aditivos para piensos que reducen las emisiones de metano, alimentos para animales y cosmeceúticos. Las algas cultivadas compiten con la biomasa recogida en lechos naturales o arrastrada por las mareas, que se obtiene a muy bajo costo. En general, no existe una legislación restrictiva sobre estas actividades, y algunos países han sobreexplotado sus reservas naturales. A esto se suma la importación de algas de bajo costo desde Asia, lo que representa un desafío para la competitividad, especialmente en las cadenas de valor de las materias primas.

El consumidor es el eslabón clave de la cadena de producción, ya que sin demanda, no hay oferta. Las estrategias comerciales y de marketing deben basarse en un buen conocimiento de las necesidades de los clientes potenciales y de las características del producto. En América Latina y el Caribe, los productores suelen carecer de este conocimiento o lo descuidan, lo que convierte al comercio, el mercado y el consumidor en eslabones débiles dentro de la cadena de producción.

Se necesitan estrategias colectivas para introducir las algas marinas en los mercados domésticos, ya que se trata de productos relativamente nuevos en la región. Además, cada finca acuícola debe contar con una estrategia de marketing propia, alineada con su modelo de negocio y sus clientes objetivo. Para garantizar la satisfacción del cliente, la estrategia de producción debe adaptarse a sus preferencias y expectativas. La construcción de una imagen positiva del producto puede llevar años, pero se puede destruir rápidamente.

INVERSIÓN, COSTOS OPERATIVOS E INDICADORES FINANCIEROS

Generalmente, los estudios económicos sobre el cultivo de algas no siguen los estándares establecidos para los análisis económicos en acuicultura (véase Engle, 2010). Por ejemplo, la mayoría de los autores no clasifican los gastos en costos fijos y variables, lo que dificulta el cálculo de indicadores importantes como el margen bruto o el punto de equilibrio. Otros estudios omiten costos esenciales o no describen con claridad qué elementos fueron considerados en los cálculos. En ocasiones, tampoco se especifica si la producción y el precio de venta corresponden a biomasa seca o húmeda, lo que obliga a los lectores a deducirlo a partir de otros datos. El grado de humedad de la materia seca también afecta a la biomasa real y, en consecuencia, incide directamente en los análisis económicos.

La producción, los costos y los rendimientos se calculan frecuentemente en función de la superficie ocupada por las zonas de cultivo en el mar. Aunque en algunos países las explotaciones deben pagar por el uso del espacio marítimo, los costos y la producción suelen estar asociados a la extensión de las cuerdas utilizadas (medida lineal), incluso si se emplean balsas. Nuestro estudio pone de manifiesto que el sector necesita urgentemente normalizar los parámetros utilizados para caracterizar y evaluar la economía del cultivo de algas marinas. Es necesario actuar con cautela al comparar fincas acuícolas y especies presentadas en este informe.

Los estudios originales se realizaron en distintas fechas y países, con monedas y contextos económicos específicos. Aunque los datos económicos se han convertido a USD (dólares de los Estados Unidos de América), esto no implica que sean totalmente comparables ni que los valores convertidos reflejen la paridad del poder adquisitivo. A corto plazo, el tipo de cambio no refleja necesariamente el poder adquisitivo relativo de las diferentes monedas. Además, los costos y beneficios pueden variar con el tiempo. Teniendo en cuenta estas limitaciones, se ofrecen a continuación una síntesis de los conocimientos disponibles sobre la economía del cultivo de algas en América Latina y el Caribe en las últimas décadas.

Se observa que la mayoría de los estudios provienen de Chile, seguidos por el Brasil y México (Cuadro 1). Esta distribución refleja la presencia de fincas comerciales en estos países. La mayoría de los análisis se centran en la fase de crecimiento de ocho especies usando cinco sistemas diferentes (Cuadro 1). Las superficies analizadas van de 0,5 hasta 50 hectáreas, aunque la mayoría de los estudios son simulaciones basadas en datos de cultivos experimentales a pequeña escala.

La productividad varía considerablemente según la especie, aunque tiende a ser consistente dentro de la misma especie y sistema de crecimiento. Una excepción es *K. alvarezii*, cuya productividad osciló entre 5,8 y 192 toneladas de peso seco por hectárea y año (Cuadro 1). La productividad se expresó en toneladas anuales de peso húmedo o seco por hectárea, o en kilogramos de peso húmedo o seco por metro lineal

CUADRO 1

Características del sistema de producción de algas marinas en América Latina y el Caribe: un análisis económico

Especie	País	PU	Sistema de producción	Área (ha)	Ciclo (d)	Productividad	Tasa de crecimiento (%/d)
<i>Gracilaria chilensis</i> ¹	Chile	F	Siembra en el fondo	6,4	150	100 tW/ha/año	-
<i>Chondracanthus chamissoi</i> ²	Chile	-	Palangre	2	60	54 gW/m/ciclo	-
<i>Chondracanthus chamissoi</i> ³	Perú	-	Criadero#	0,0124	60	-	-
<i>Eucheuma isiforme</i> ⁴	Colombia	F	Palangre y Balsas flotantes	0,5	90	13,3 tW/ha/año	1,58
<i>Hypnea pseudomusciformis</i> ⁵	Brasil	F	Palangre	7,5 y 25	45	0,8 tD/ha/año	5,66§
<i>Kappaphycus alvarezii</i> ⁶	México	F	Cultivo suspendido y Balsas flotantes	1	60	27 to 54 tD/ha/año	5,4 a 5,6
<i>Kappaphycus alvarezii</i> ⁷	México	F	Cultivo suspendido y Balsas flotantes	1	60	5,8 kgD/m/año	-
<i>Kappaphycus alvarezii</i> ⁸	Brasil	F	Balsas flotantes (con mariscos)	1	36 a 97	13,6 to 24,2 tD/ha/año	0,32 a 5,12
<i>Kappaphycus alvarezii</i> ⁹	Brasil	F	Balsas flotantes	0,2	45	14,4 tW/ha/año*	-
<i>Kappaphycus alvarezii</i> ¹⁰	Brasil	F	Balsas flotantes	0,4 to 2	55	130 a 160 tW/ha/año*	-
<i>Kappaphycus alvarezii</i> ¹¹	Brasil	F	Palangre (con mariscos)	0,4	60	29,4 tonnes/ha/año*	-
<i>Kappaphycus alvarezii</i> ¹²	Ecuador	F	Balsas flotantes	10	19 a 70	12,1 tD/ha/año*	3 a 15
<i>Kappaphycus alvarezii</i> ¹³	México	F	Palangre y Balsas flotantes	1	60	22 a 192 tD/ha/ciclo	5,4 a 5,6
<i>Lessonia trabeculata</i> ¹⁴	Chile	S	Palangre	-	90 a 365	-	-
<i>Lessonia trabeculata</i> ²	Chile	-	Palangre	9,75	365	14 kgW/m/ciclo	-
<i>Macrocystis pyrifera</i> ¹⁵	Chile	S	Palangre	10 a 50	270	41 kgW/m/año	-
<i>Macrocystis pyrifera</i> ¹⁶	Chile	S	Palangre	15	240	173 a 400 tW/ha/año*	-
<i>Macrocystis pyrifera</i> ¹⁷	Chile	S	Palangre	6	150	-	0,02 a 0,03
<i>Macrocystis pyrifera</i> ¹⁸	Chile	S	Palangre	10	210 a 240	12,4 kgW/m	-
<i>Sarcopeltis skottsbergii</i> ¹⁹	Chile	-	Siembra directa	-	365	-	-
<i>Sarcopeltis skottsbergii</i> ²⁰	Chile	F	Palangre	-	390	4,8 a 10,4 tW/ha/año	0,8 a 0,9
<i>Sarcopeltis skottsbergii</i> ²¹	Chile	S	Palangre	-	90	204 t/ha/año	0,74

PU= plántulas utilizadas; F= fragmentación; S= esporas; d= día; W= peso húmedo; D= peso seco; #Un criadero que produce plántulas esporuladas en cuerdas; §Fuente Pereira, Kimpara y Valenti, 2020b; *Convertido en el presente estudio basado en la idea original.

Fuentes: (1) Zuniga-Jara y Contreras, 2020; (2) Zuniga-Jara y Soria-Barreto, 2018; (3) Ruíz *et al.*, 2021; (4) Rincones y Tirado, 2011; (5) Pereira, Kimpara y Valenti, 2020a; (6) Robledo, Gasca-Leyva y Fraga, 2013; (7) Valderrama *et al.*, 2015; (8) Santos *et al.*, 2018; (9) Gelli *et al.*, 2020; (10) Nogueira y Henriques, 2020; (11) Silva, Castilho-Barros y Henriques, 2022; (12) Montúfar-Romero *et al.*, 2023; (13) Robledo y Domínguez-May, pendiente de publicación; (14) Westermeier, 2011; (15) Correa *et al.*, 2014; (16) Muñoz, 2015; (17) Zuniga-Jara, Marin-Riffo y Bulboa-Contador, 2016; (18) Camus, Infante y Buschmann, 2019; (19) Soto, 2011; (20) Westermeier *et al.*, 2012; (21) Zuniga-Jara, Soria-Barreto y Godoy-Alfaro, 2022.

de cuerda por ciclo o por año (Cuadro 1). Estas variaciones dificultan las comparaciones de producción y resultados económicos entre estudios.

Los ciclos de producción suelen ser cortos en el caso de las algas rojas, oscilando normalmente entre 45 y 60 días. Una excepción es *G. chilensis*, que se estima en un ciclo de 150 días. Para los quelpos, los ciclos analizados en los estudios económicos oscilaron entre 5 y 12 meses. Solo se evaluó económicamente un criadero (*C. chamissoi* en el Perú), cuyos resultados arrojaron indicadores financieros prometedores (Cuadro 1 y Cuadro 2).

Los estudios revelan que la acuicultura de algas marinas requiere, en general, una inversión inicial baja. Esta puede variar entre los 3 000 a 280 000 USD, aunque la mayoría de las explotaciones se han establecido con menos de 30 000 USD (Cuadro 2). El total de la inversión depende del tamaño de la finca. Las fincas con inversiones iniciales mayores a 50 000 USD suelen tener más de 5 hectáreas o incluyen instalaciones para el cocultivo con moluscos (Santos *et al.*, 2018) o con infraestructura en tierra para la producción de cuerdas con esporofitos en desarrollo (Zuniga-Jara y Soria-Barreto, 2018; Ruíz *et al.*, 2021; Muñoz, 2015; Zuniga-Jara, Soria-Barreto y Godoy-Alfaro, 2022). Muchas fincas pequeñas que empezaron con inversiones entre 10 000 y 20 000 USD pueden ser atractivas para inversionistas o como fuentes de ingresos para una familia (Cuadro 2).

CUADRO 2
Indicadores económicos para la acuicultura de algas marinas en América Latina y el Caribe

Especie	Año	País	Inversión (1 000 USD)	Costos operativos (1 000 USD)	Gastos principales	Precio de venta (USD/kg W o D)	Amortización (años)	VAN (1 000 USD)	TIR (%)
<i>Gracilaria chilensis</i> ¹	2020	Chile	157,9	6,5	Mano de obra	0,1 to 0,3 W	8	~ 0	-
<i>Chondracanthus chamissoi</i> ²	2018	Chile	43,1	79,2	Plántulas, mano de obra, administración	0,49 W	nr	< 0	-
<i>Chondracanthus chamissoi</i> ³	2021	Perú	69,3*	39,3 a 46,8*	Mano de obra	1,2 by m de cuerda*	~5	70,4*	33
<i>Eucheuma isiforme</i> ⁴	2011	Colombia	3,6 y 8,6	1,4	Depreciación	1,0 D	-	-	65 y 156
<i>Hypnea pseudomusciformis</i> ⁵	2020	Brasil	25,6 y 68,2	49,2 y 130	Mano de obra, impuestos	14,63 D	1,6 y 1,7	296 y 977	97 y 119
<i>Kappaphycus alvarezii</i> ⁶	2013	México	10,5 y 13,9	23,9 a 36,7	Mano de obra	0,6 to 1,4 D	0,5 a 2,7	7,9 a 73,3	25 a 189
<i>Kappaphycus alvarezii</i> ⁷	2015	México	10,3 y 13,6	34,6 y 35,3	Mano de obra, combustible	0,6 a 1,4 D	-	-	-
<i>Kappaphycus alvarezii</i> ⁸	2018	Brasil	70,4 a 119,6	13,7 a 28,6	-	1,4 a 1,5 D	1,9 a 4,9	73 a 570	23,2 a 59,3
<i>Kappaphycus alvarezii</i> ⁹	2020	Brasil	16,6 y 17,3	26,1 a 36,6	Mano de obra	0,14 W or 5,53 por litro*	nr, 0,75 a 25,68	-159 a 284	nr, 39-216
<i>Kappaphycus alvarezii</i> ¹⁰	2020	Brasil	9,4 y 20,7	10,2 y 55,9	Mano de obra	0,12 a 0,14 W	1,2 a 2,5	-37,4 a 39,4	nr, 38 a 88
<i>Kappaphycus alvarezii</i> ¹¹	2022	Brasil	31,7 a 34,8	10,2 a 15,2	Mano de obra, Plántulas	0,15 W	2,94 a 4,24	40,4 a 97,2	28,3 a 39,4
<i>Kappaphycus alvarezii</i> ¹²	2023	Ecuador	-	179,8	Plántulas, Mano de obra, administración	-	4,3	58,3	16,5
<i>Kappaphycus alvarezii</i> ¹³	2024	México	14,4 y 34,3	1,4 a 10,4	-	1,3 a 1,5 D	1 a 3	42,1 a 131,7	44 a 241
<i>Lessonia trabeculata</i> ¹⁴	2011	Chile	-	-	-	0,03 a 0,9 W	-	-	-
<i>Lessonia trabeculata</i> ²	2018	Chile	179,7	88,1	Plántulas, Mano de obra, administración	0,35 W	5,5	-	-
<i>Macrocystis pyrifera</i> ¹⁵	2014	Chile	-	109	Mano de obra	0,059 a 0,098 W	nr a 1	-657 a 1,534	nr a 452
<i>Macrocystis pyrifera</i> ¹⁶	2015	Chile	250*	124 a 169*	Mano de obra, administración, combustible, logística	0,06 W *	-	106*	27,7
<i>Macrocystis pyrifera</i> ¹⁷	2016	Chile	31,26	56,8	Mano de obra, administración	0,25 W	nr	-50 a -300	nr
<i>Macrocystis pyrifera</i> ¹⁸	2019	Chile	81,9	88,5	Mano de obra, gastos navieros, Plántulas	0,087 W	2,3	165	48
<i>Sarcopeltis skottsbergii</i> ¹⁹	2011	Chile	3,3*	1,4 a 6,2*	Mano de obra, administración, gastos navieros	1,27 D	-	3,6*	56
<i>Sarcopeltis skottsbergii</i> ²⁰	2012	Chile	2,5	1,0 a 1,2	-	0,34 a 0,39 W	-	0,74 y 2,4	27 y 55
<i>Sarcopeltis skottsbergii</i> ²¹	2022	Chile	358,4	111,3	Mano de obra, plantar, administración	0,4 a 0,5 W	nr	nr	-

W= peso húmedo; D= peso seco; nr= no resultados obtenidos; VAN= valor actual neto; TIR= tasa interna de retorno; #Un criadero que produce plántulas esporuladas en cuerdas; @biostimulante agrícola; *Valores convertidos a dólares americanos en abril del 2024 (1 peso chileno = 0,0011 USD; 1 Sol = 0,27 USD).

Fuentes: (1) Zuniga-Jara y Contreras, 2020; (2) Zuniga-Jara y Soria-Barreto, 2018; (3) Ruiz et al., 2021; (4) Rincones y Tirado, 2011; (5) Pereira, Kimpara y Valenti, 2020a; (6) Robledo, Gasca-Leyva y Fraga, 2013; (7) Valderrama et al., 2015; (8) Santos et al., 2018; (9) Gelli et al., 2020; (10) Nogueira y Henriques, 2022; (11) Silva, Castilho-Barros y Henriques, 2022; (12) Montufar-Romero et al., 2023; (13) Robledo y Dominguez-May, pendiente de publicación; (14) Westermeier, 2011; (15) Correa et al., 2014; (16) Muñoz, 2015; (17) Zuniga-Jara, Marin-Riffo y Bulboa-Contador, 2016; (18) Camus, Infante y Buschmann, 2019; (19) Soto, 2011; (20) Westermeier et al., 2012; (21) Zuniga-Jara, Soria-Barreto y Godoy-Alfaro, 2022.

En Chile, los cultivos de quelpos necesitan más capital inicial, ya que se desarrollan en zonas más profundas y necesitan un criadero en tierra para producir las plántulas por esporulación.

Los costos operativos suelen ser iguales o incluso superiores a la inversión inicial, siendo la mano de obra el mayor costo (Cuadro 2). La acuicultura de algas marinas es una actividad altamente intensiva en mano de obra, que implica labores exigentes de siembra de plántulas, limpieza constante para evitar la acumulación de suciedad y de epifitas, recolección de biomasa y procesamiento artesanal. Los costos operativos de plántulas también son elevados, especialmente en Chile. La obtención o producción de cuerdas con plántulas de quelpos (por ejemplo: *M. pyrifera* y *L. trabeculata*) y de algunas algas rojas (por ejemplo: *S. scottsbergii* y *C. chamissoi*) es una operación de alto costo operativo (Zuniga-Jara, Marín-Riffo y Bulboa-Contador, 2016; Zuniga-Jara y Soria-Barreto, 2018; Zuniga-Jara, Soria-Barreto y Godoy-Alfaro, 2022). El costo del combustible puede ser elevado en fincas alejadas de la costa. En el Brasil, los impuestos pueden representar hasta el 50 % de los costos operativos (Pereira, Kimpara y Valenti, 2020a), dependiendo del mercado de destino. Además, los cultivos de *M. pyrifera* y *S. scottsbergii* pueden verse afectados por elevados impuestos sobre el uso del espacio marítimo y los combustibles (Zuniga-Jara, Marín-Riffo y Bulboa-Contador, 2016; Zuniga-Jara, Soria-Barreto y Godoy-Alfaro, 2022).

La viabilidad económica está estrechamente vinculada a la productividad de las algas, la cual depende de la tasa de crecimiento y el precio de venta (Zuniga-Jara, Soria-Barreto y Godoy-Alfaro, 2022). Las tasas de crecimiento son generalmente altas para las algas rojas, pudiendo alcanzar el 5 o 6 % diario, mientras que las algas pardas presentan tasas más bajas, inferiores al 1 % diario, lo que prolonga los ciclos de producción. El tamaño de las plántulas sembradas también influye significativamente en la producción final y en los resultados económicos. Robledo, Gasca-Leyva y Fraga (2013) demostraron que duplicar el tamaño de las plántulas de *K. alvarezii* (de 50 a 100 g) aumentó de forma notable la productividad, los beneficios netos (de 3 000 a 18 000 USD), el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR). No se observaron diferencias al comparar sistemas de cultivo flotante suspendido.

Los precios de venta pueden oscilar entre 0,10 y 0,60 USD, lo que en muchos casos explica la baja rentabilidad de las fincas. Algunos estudios simulaban precios mayores a 1 USD/kg, mostrando así escenarios económicos viables (Cuadro 2). En general, los estudios que reportaron un VAN cercano a superior a 100 000 USD consideraron escenarios con un precio de venta superior a 1 USD/kg de alga seca o superficies productivas mayores a 10 hectáreas (Cuadro 1 y Cuadro 2). El precio más alto identificado fue de 14,63 USD/kg para *H. pseudomusciformis*, en base a una encuesta sobre la disposición de pago de los consumidores por el producto en el mercado de alimentación humana en el Brasil (Pereira, Kimpara y Valenti, 2020a, 2020b). Este precio incluso se incrementó cuando *H. pseudomusciformis* o *K. alvarezii* se vendieron en envases pequeños (Figura 2).

El monocultivo de *K. alvarezii* en superficies de entre 0,2 a 1 hectárea en el Brasil y México, y de 10 hectáreas en el Ecuador, mostró rendimientos económicos bajos cuando el objetivo era el mercado de ficocoloides. El VAN fue generalmente negativo, con un máximo estimado de 70 000 USD en un plazo de amortización de cinco años, solo bajo escenarios simulados con mayor productividad o precios más elevados (Cuadro 2). Los mercados emergentes pueden representar una opción válida frente a los bajos precios del mercado tradicional de ficocoloides. Gelli *et al.* (2020) concluyeron que el monocultivo de *K. alvarezii* para la industria de la carragenina no es económicamente viable, pero sí lo es cuando se transforma en bioestimulante agrícola, con un TIR entre 39 a 216 %, según el precio de venta. De igual forma, Kimpara y Valenti (2020a), demostraron que el cultivo de *H. pseudomusciformis* no es rentable como materia prima para producir carragenina, pero sí lo es como alimento

humano o para la producción de extracto glicólico que se vende como cosmeceútico. En este caso, el VAN puede alcanzar casi 1 millón de USD, con una amortización en menos de dos años en un área de 22,5 hectáreas.

Solo se identificó un análisis económico para la especie más cultivada de la región, *G. chilensis*. El estudio consideró un área de producción de 6,4 hectáreas con plántulas de siembra de fondo, asumiendo una productividad de 100 toneladas/hectáreas de peso húmedo y un precio de venta de 0,10/kg de peso húmedo de algas marinas en el mercado de ficocoloides. La actividad se considera viable a largo plazo, aunque el flujo de caja se vuelve positivo solo después de ocho años (Zuniga-Jara y Contreras, 2020). Estos resultados reflejan una actividad poco atractiva, y se recomienda realizar más estudios para confirmar estas conclusiones. Algunos análisis muestran que el cultivo de algas marinas en América Latina y el Caribe, y en otras partes del mundo, no es suficientemente atractivo para los inversores privados. Por ello, se recomienda como fuente complementaria de ingresos para las comunidades costeras con bajos recursos (Rincones y Tirado, 2011; Westermeier *et al.*, 2012; Nogueira y Henriques, 2020; FAO, 2023). Los productores de *G. chilensis* deberían disponer de presupuestos empresariales sólidos para negociar mejores precios con la industria de ficocoloides y explorar mercados alternativos, como los emergentes (Figura 1), que podrían mejorar sus ingresos.

Los estudios también muestran que el cultivo de *M. pyrifera* en superficies inferiores a 10 hectáreas es poco o nada rentable, debido al bajo precio en el mercado (0,06 a 0,10/kg de peso húmedo), el elevado costo de las plántulas y un ciclo productivo prolongado de hasta nueve meses (Cuadro 2). Sin embargo, puede ser rentable para operaciones a gran escala (Correa *et al.*, 2014; Muñoz, 2015; Zuniga-Jara, Marín-Riffo y Bulboa-Contador, 2016; Camus, Infante y Buschmann, 2019). En una proyección sobre 50 hectáreas con un precio de venta de 0,10 USD/kg de peso húmedo, el VAN alcanzó valores de hasta 1,5 millones de USD (Correa *et al.*, 2014), el valor más alto registrado en los estudios revisados (Cuadro 2). Si se destina a mercados alimentarios, *M. pyrifera* podría ofrecer mayor rentabilidad (Camus y Hernández-González, 2019).

El quelpo *Lessonia trabeculata* tiene un ciclo de producción largo, de hasta un año (Cuadro 1). Según un estudio de Westermeier (2011), su cultivo no es rentable cuando se utiliza como alimento para abulón ni como materia prima para industrias de ficocoloides. Sin embargo, el mismo estudio demostró que puede ser viable cuando se usa para mercados emergentes como los biocombustibles o alimentos para animales. Otro estudio mostró que el cultivo de *L. trabeculata* puede ser rentable en un área de producción de 9,75 hectáreas si se vende a 0,35 USD/kg de peso húmedo (Cuadro 2). El período de amortización es de 5,5 años y el VAN es de aproximadamente 400 000 USD en un plazo de 20 años (Zuniga-Jara y Soria-Barreto, 2018).

El cultivo de *S. skottsbergii* (previamente *G. skottsbergii*) no es económicamente viable, generando un VAN inferior a 4 000 USD (Cuadro 2). Incluso con mayores inversiones, serían necesarios precios y volúmenes más altos para lograr rentabilidad (Soto, 2011; Westermeier *et al.*, 2012; Zuniga-Jara, Soria-Barreto y Godoy-Alfaro, 2022). Tras más de 30 años de intentos en Chile, el cultivo de *S. skottsbergii* continúa siendo poco atractivo económicamente (Zuniga-Jara, Soria-Barreto y Godoy-Alfaro, 2022).

La integración de la producción de algas marinas en sistemas de acuicultura multitrófica integrada (AMTI), junto con peces, camarones o mariscos, representa una oportunidad para diluir la inversión y mejorar la producción mediante el incremento de la variedad y cantidad de productos sin incrementar los costos de producción. Por ejemplo, un estudio llevado a cabo en la década de 1990 mostró que *G. chilensis* era más productiva y rentable cuando se cultivaba en jaulas de salmón (Troell *et al.*, 1997). Otros análisis económicos han demostrado que el VAN del cultivo de *K. alvarezzi* en AMTI con moluscos aumentó entre un 140 % y 680 % en comparación con monocultivos en áreas de 0,4 y 1 hectárea (Santos *et al.*, 2018; Silva, Castilho-Barros y Henriques, 2022).

Un estudio llevado a cabo en el Perú por Ruiz *et al.* (2021) demostró que un criadero para producir plántulas de *C. chamissoi* puede ser económicamente rentable, con un VAN de 70 400 USD, un periodo de amortización de 8 años y un TIR del 33 % (Cuadro 2). Sin embargo, el crecimiento de esta especie en el mar no mostró ninguna ganancia en fincas de 2 hectáreas (Zúñiga-Jara, 2018), lo que sugiere que la producción proyectada podría no concretarse. No obstante, los resultados indican que la producción de plántulas en criaderos puede ser factible.

Por último, cabe señalar que la mayoría de los estudios citados no obtuvieron datos de explotaciones reales. En su mayoría utilizan datos experimentales y los aplican en simulaciones sobre explotaciones hipotéticas. En algunos casos, las tasas de crecimiento provienen de estudios realizados en otras regiones, y los precios de mercado se estiman de forma deficiente. Por lo tanto, el cultivo de algas en la región carece todavía de estudios económicos sólidos y representativos basados en contextos reales.

IMPULSAR LOS MERCADOS TRADICIONALES Y EXPLOTAR LOS EMERGENTES

Las algas marinas se han utilizado tradicionalmente para el consumo humano, ya sean frescas, secas o en conserva, o como materia prima para extractos como la carragenina, el agar y los alginatos. Este es, sin duda, el mercado principal, actualmente dominado por grandes actores a nivel mundial. No obstante, han surgido numerosos mercados emergentes con demanda creciente de algas, entre ellos los nutracéuticos, cosmeceúticos, farmacéuticos, proteínas alternativas, fábricas de alimento para animales, fertilizantes y bioestimulantes agrícolas, así como textiles y bioplásticos, entre otros (Banco Mundial, 2023). Se estima que estos mercados emergentes podrían alcanzar un valor de hasta 11,8 mil millones de USD para 2030 (Banco Mundial, 2023). Son mercados diversos, con precios y niveles de demanda variables.

Los países con mayor volumen de producción, como China, Indonesia y Filipinas, controlan los mercados primarios (Cai *et al.*, 2021). Una estrategia para evitar la competencia directa en estos mercados dominados es cultivar una variedad de especies de algas marinas nativas con potencial para llegar a dichos mercados emergentes. Sin embargo, la mayoría de estos mercados aún están en desarrollo, y su consolidación llevará tiempo. Por ejemplo, el lanzamiento de nuevos productos farmacéuticos conlleva desafíos como regulaciones estrictas, altos costos de desarrollo y largos plazos para que los productos lleguen al mercado. Asimismo, los textiles y bioplásticos todavía necesitan importantes mejoras en la calidad y reducción de costos de producción. El mercado del carbono carece de regulación, y actualmente no existe un método estandarizado para demostrar el secuestro de carbono por parte de las algas marinas. Además, este carbono debe inmovilizarse a largo plazo, y el alto costo de las auditorías lo hace inviable para las fincas pequeñas.

Es importante desarrollar y explotar los mercados relacionados con la alimentación humana directa y con los extractos para cosméticos. En países como el Brasil, algunos productores ya comercializan directamente estos productos al consumidor final con márgenes de rentabilidad elevados (Pereira, Kimpara y Valenti, 2020a). En estos casos, las cadenas de valor descendente son cortas y eficientes, lo que convierte esta actividad en una opción lucrativa y atractiva. Un estudio de mercado realizado en el Brasil con unos 800 participantes mostró que aproximadamente el 60 % de los consumidores potenciales estarían dispuestos a pagar más de 14 USD/kg de peso húmedo por algas destinadas al consumo alimentario (Pereira, Kimpara y Valenti, 2020a).

En grandes ciudades de América Latina y el Caribe, como Ciudad de México, São Paulo, Santiago o Lima, existen mercados especializados en pescados y mariscos aún sin explotar. Las comunidades y restaurantes étnicos, especialmente de origen asiático, representan nichos de mercado en múltiples ciudades y zonas turísticas. Una gran oportunidad es el crecimiento del colectivo vegetariano y vegano en la región,

dispuesto a pagar precios elevados por algas marinas frescas, siempre que el producto sea de alta calidad y exista un suministro constante.

Para satisfacer a estos consumidores, el producto debe mantenerse en condiciones óptimas desde la recolección hasta el consumo final. El envase debe incluir instrucciones claras de conservación y preparación, y los puntos de venta deberían contar con folletos informativos y recetas.

En la región se ha consolidado un importante mercado para el uso del extracto de algas como bioestimulante agrícola (Gelli *et al.*, 2020). Sin embargo, los acuicultores suelen vender las algas a intermediarios, quienes las procesan para elaborar bioestimulante, pagándoles entre 0,55 USD a 1,00 USD/kg de peso húmedo. Estos precios no cubren los costos de producción ni garantizan márgenes de beneficio. Para lograr rentabilidad, sería necesaria una productividad muy alta y la ausencia de pérdidas durante todo el año. Estas empresas procesadoras venden el producto final directamente a las fincas agrícolas, lo que implica una cadena de valor muy limitada, en la que el acuicultor queda en clara desventaja.

En algunos países de la región existen mercados internos para la carragenina y el agar. Sin embargo, muchas industrias importan algas secas desde Asia o recolectan biomasa de su lecho natural. Por otro lado, los bajos precios practicados por la exportación asiática de algas ficocoloides hacen que la producción no sea viable económicamente en América Latina y el Caribe. Por ejemplo, a finales de la década anterior, los refinadores de ficocoloides en el Brasil pagaban aproximadamente 0,60 USD/kg de peso seco (con cerca del 10 % de humedad) para la producción de carragenina (Pereira, Kimpara y Valenti, 2020a). En este contexto, la producción local de hidrocoloides solo sería viable si se combina con la extracción de biomoléculas destinadas a mercados emergentes, como los farmacéuticos, nutracéuticos y cosmeceúticos. Las biorrefinerías podrían estar dispuestas a comprar biomasa de algas nacionales si las importadas no contienen las biomoléculas de interés, lo que permitirá negociar precios más justos para los agricultores.

La exportación de algas cultivadas como materia prima básica resulta, por ahora, inviable debido a los bajos precios ofrecidos por los principales actores asiáticos. En 2019, los precios promedio de primera venta para algas marinas húmedas fueron: 0,39 USD/kg para las algas rojas, 0,47 USD/kg para las algas marrones y 0,79 USD/kg para las algas verdes (Cai *et al.*, 2021). Los precios iniciales de venta de *Gracilaria*, *Laminaria/Saccharina* y *Kappaphycus/Eucheuma* fueron de 0,54 USD/kg, 0,37 USD/kg y 0,21 USD/kg, respectivamente (Cai *et al.*, 2021). En 2024, los precios de venta libre a bordo (FOB) de origen en el mercado internacional eran de aproximadamente 1 000 USD por tonelada para las carragenófitas y de 1 200 USD por tonelada para las agarofitas.

OPORTUNIDADES DE FINANCIAMIENTO

El cultivo de algas marinas en América Latina y el Caribe se financia a través de varias fuentes, incluyendo capital privado, ONGs, fondos de desarrollo y entidades privadas que invierten en proyectos ecosociales o que obtienen beneficios fiscales al implementar iniciativas de desarrollo sostenible. Por otra parte, las ONGs y las compañías que promueven una economía socioambiental sostenible suelen apoyar el cultivo de algas marinas nativas por parte de las comunidades costeras, pueblos indígenas o grupos pesqueros tradicionales. En algunos países, como Chile (Camus, Infante y Buschmann, 2019; Camus y Hernández-González, 2019), los gobiernos otorgan subsidios que actúan como formas de financiamiento parcial.

También se observa un creciente interés en el uso de especies nativas en acuicultura, con múltiples investigaciones en curso en universidades e institutos de investigación. Este conocimiento debe transformarse en tecnología aplicada y, posteriormente, en productos comerciales. En este sentido, la creación de *startups* tecnológicas puede facilitar la transferencia tecnología a disposición de las empresas. Algunos países

cuentan con fondos específicos para apoyar este tipo de emprendimientos, lo que representa una fuente valiosa de capital para poner en marcha proyectos de cultivo de algas marinas. Asimismo, el cultivo de especies asiáticas podría atraer inversiones internacionales de grandes corporaciones interesadas en expandir sus operaciones globales.

El cultivo de algas marinas en América Latina y el Caribe se enmarca en el concepto de bioeconomía, ya que se trata de una actividad basada en la biodiversidad, con un enfoque regenerativo para los ecosistemas, presenta una baja huella de carbono y potencial para generar desarrollo económico y social entre poblaciones vulnerables, como las comunidades costeras tradicionales (Banco Mundial, 2023). Además, se trata de una actividad intensiva en mano de obra en la que las mujeres han demostrado una destacada adaptación (FAO, 2023).

Por estas razones, una vía importante de financiación para impulsar el cultivo de algas marinas puede encontrarse en fondos alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), tales como la erradicación de la pobreza (ODS 1), la lucha contra el hambre (ODS 2), el empoderamiento de las mujeres (ODS 5), el consumo y la producción sostenibles (ODS 12), la acción por el clima (ODS 13) y la vida submarina (ODS 14). Estos fondos pueden estar disponibles en los propios países o en instituciones internacionales.

NUEVAS ESTRATEGIAS PARA IMPULSAR EL CULTIVO DE ALGAS MARINAS EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

Las estrategias para impulsar el cultivo de algas en América Latina y el Caribe a corto plazo incluyen promover su uso como alimento humano, explorar los mercados verdes y algunos mercados emergentes (como los bioestimulantes agrícolas y los cosmeceúticos), desarrollar cadenas de valor descendentes cortas e integrar esta actividad en los programas nacionales destinados a la reducción de la pobreza y alcanzar el cumplimiento de los ODS. En algunos países, una regulación clara sobre el cultivo de especies exóticas, como *K. alvarezii*, puede facilitar una rápida expansión de las explotaciones de algas si se accede a los mercados adecuados.

Las estrategias a largo plazo pueden centrarse en la identificación de compuestos bioactivos o materias primas de alto valor en algas nativas — más allá de los ficocoloides tradicionales— para posicionarse en mercados emergentes, como el farmacéutico, el nutracéutico, el textil y el bioplástico. A partir de ahí, deben implementarse programas específicos para el desarrollo tecnológico del cultivo y de los procesos industriales necesarios para obtener productos adecuados, con el objetivo de alcanzar niveles de preparación tecnológica (TRL) superiores a 6. Posteriormente, es esencial desarrollar una cadena de producción sólida para cada producto. En cada fase, los análisis económicos realistas y estandarizados serán clave para establecer modelos de negocio rentables. Otra posible línea de trabajo a largo plazo es el desarrollo de métodos para demostrar y cuantificar el secuestro de dióxido de carbono por parte de las algas marinas, asociado a los sistemas de producción.

Según el Subcomité de Acuicultura de la FAO (FAO, 2023), el consumo humano de algas marinas es el principal motor para estabilizar y desarrollar el sector. Aunque la población de América Latina y el Caribe tiene poca tradición culinaria con algas, este es un mercado emergente para los alimentos vegetarianos y veganos. Además, la creciente demanda de nuevos productos alimentarios sanos y sabrosos podría favorecer un cambio en los hábitos alimentarios y comportamiento de los consumidores. Anclar la producción de algas en mercados estables como el alimentario puede contribuir a estabilizar las explotaciones y aumentar la producción y el suministro de biomasa para apoyar el desarrollo de otros mercados emergentes.

Es vital el desarrollo de cadenas de valor descendentes cortas, con uno o dos eslabones entre la explotación y el consumidor final, para hacer las fincas acuícolas de

algas marinas económicamente viables. Se debería priorizar el modelo de negocio B2C (empresa a consumidor) frente al B2B (empresa a empresa). Para ello, los acuicultores pueden adoptar modelos de integración vertical que incorporen fases como la distribución y la comercialización. Esta estrategia puede hacer que fincas pequeñas sean económicamente viables y competitivas, como ya ocurre con ciertas piscifactorías de pequeña escala en América Latina (Gilson *et al.*, 2024).

La competencia con los grandes productores asiáticos representa un riesgo considerable, especialmente si los mercados nacionales experimentan un crecimiento significativo. Enfrentarse a los grandes productores asiáticos de algas es complejo debido a sus bajos precios de venta, que son incluso inferiores a los costos de producción en América Latina y el Caribe. Muchas especies de algas verdes, pardas y rojas son materias primas internacionales. En mercados integrados, los productos suelen ajustarse a la Ley del Precio Único, ya que pueden sustituirse fácilmente por bienes similares. Como resultado, el arbitraje de materias primas reasigna los activos hasta que los precios se alinean. Las diferencias de precios suelen mantenerse únicamente por las diferencias en la calidad del producto, los costes de transporte, los aranceles y las barreras comerciales.

Para hacer frente a este contexto, se necesitan estrategias disruptivas que permitan diversificar las cadenas de producción de las especies de algas y ofrecer productos diferenciados, capaces de competir con los grandes actores internacionales en los mercados nacionales. Una posible solución consiste en utilizar compuestos bioactivos o materias primas de alto valor producidos por algas nativas, que no pueden extraerse de especies importadas de Asia. Esto podría sentar las bases para establecer biorrefinerías multiproducto viables, utilizando algas producidas en América Latina y el Caribe.

CONCLUSIONES

La sostenibilidad económica del cultivo de algas marinas en América Latina y el Caribe depende de proyectos bien planificados y rentables, así como de una cadena de producción sólida que genere ingresos suficientes para mantener el compromiso de los agricultores. Sin embargo, el sector aún carece de estudios económicos exhaustivos basados en condiciones reales de explotación.

Aunque el cultivo de algas requiere menores requisitos de inversión y costos operativos en comparación con otros sectores de la acuicultura, sigue siendo una actividad intensiva en mano de obra. En consecuencia, los costos laborales, junto con los gastos en plántulas y tareas administrativas, constituyen los principales gastos operativos.

Muchas explotaciones tienen dificultades para lograr la viabilidad económica cuando se centran únicamente en la extracción de ficocoloides. Sin embargo, la integración vertical (que incluye fases como el procesado, la distribución y la comercialización) puede mejorar sustancialmente la rentabilidad en el mercado alimentario.

Para reforzar la sostenibilidad económica del sector, es fundamental fortalecer toda la cadena de producción, lo cual requiere una comprensión detallada del flujo de materiales, información y valor a través de sus diversos componentes. La formulación de estrategias de producción y decisiones empresariales bien fundamentadas, basadas en un conocimiento profundo de las cadenas de suministro regionales, será esencial para construir una industria de algas sólida, rentable y resiliente.

REFERENCIAS

Arias-Echeverri, J.P., Zapata-Ramírez, P.A., Ramírez-Carmona, M., Rendón-Castrillón, L. y Ocampo-López, C. 2022. Present and future of seaweed cultivation and its applications in Colombia. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10: 243. <https://doi.org/10.3390/jmse10020243>

- Avila, M., Aroca, G., Rodríguez, D., Riquelme, Ri., Piel, M.I., Ramírez, M.E. y De Zarate, C. 2019. Manual de buenas prácticas para el cultivo del Pelillo (*Agarophyton chilensis* ex *Gracilaria chilensis*) Serie programa para la Pesca Artesanal. VI *Manual de buenas prácticas para el pelillo*. Universidad Arturo Prat, Instituto de Ciencia y Tecnología, Puerto Montt. 20 pp.
- Avila-Peltroche, J. 2024. Estado actual y retos del marco regulatorio para el cultivo de macroalgas en Latinoamérica. *Acuialgas* (Unpublished).
- Bak, U.G., Gregersen, O. y Infante, J. 2020. Technical challenges for offshore cultivation of kelp species: lessons learned and future directions. *Botanica Marina*, 63(4): 341–353. <https://doi.org/10.1515/bot-2019-0005>
- Bush, SR., Belton, B., Little, DC. y Islam, M.S. 2019. Emerging trends in aquaculture value chain research. *Aquaculture*, 498: 428–434. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0044848618318817?via%3Dihub>
- Cai, J., Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Cornish, L., Dabbadie, L., Desrochers, A., Diffey, S., Garrido Gamarro, E., Geehan, J., Hurtado, A., Lucente, D., Mair, G., Miao, W., Potin, P., Przybyla, C., Reantaso, M., Roubach, R., Tauati, M. y Yuan, X. 2021. Seaweeds and microalgae: an overview for unlocking their potential in global aquaculture development. *FAO Fisheries and Aquaculture Circular*, No. 1229. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb5670en>
- Camus, C., Infante, J. y Buschmann, A.H. 2018. Overview of 3 year precommercial seafarming of *Macrocystis pyrifera* along the Chilean coast. *Reviews in Aquaculture*, 10(3): 543–559. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/raq.12185>
- Camus, C., Infante, J. y Buschmann, A.H. 2019. Revisiting the economic profitability of giant kelp *Macrocystis pyrifera* (Ochrophyta) cultivation in Chile. *Aquaculture*, 502: 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.12.030>
- Camus, C. y Hernández-González, M.D. 2019. The seaweed resources of Chile over the period 2006–2016: moving from gatherers to cultivators. *Botanica Marina*, 62: 237–247. <https://doi.org/10.1515/bot-2018-003>
- Castro, J. Z. y Yokoya, N.S. 2019. Growth and biochemical responses of tropical and subtropical strains of *Gracilaria domingensis* (Gracilariales, Rhodophyta) to temperature and irradiance variations. *Journal of Applied Phycology*, 31(1): 607–613. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1520-4>
- Cohen, F., Faria, A., Braga, E., Chiozzini, V. y Plastino, E. 2022. Gracilarioid algae (Rhodophyta) cultured in eutrophic synthetic seawater: potential for growth and preliminary bioremediation assessment. *Journal of Applied Phycology*, 34: 2783–2791. <https://doi.org/10.1007/s10811-022-02728-9>
- Correa, T., Gutierrez, A., Flores-Aguilar, R., Buschmann, A.H., Cornejo, P. y Bucarey, C. 2014. Production and economic assessment of giant kelp *Macrocystis pyrifera* cultivation for abalone feed in the south of Chile. *Aquaculture Research*, 47: 698–707. <https://doi.org/10.1111/are.12529>
- Engle, C.R. 2010. *Aquaculture economics and financing: Management and analysis* Wiley-Blackwell, Iowa. 260 pp.
- Engle, C. 2019. *Aquaculture businesses: a practical guide to economics and marketing*. 5m Publishing, Sheffield. 333 pp.
- FAO. 2022. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022*. Rome, FAO, Towards blue transformation. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>
- FAO. 2023. *Recognizing and enhancing the contribution of algae to global aquaculture development*. Hermosillo, Mexico, 16 to 19 May 2023. COFI:AQ/XII/2023/5. FAO, Rome. 11 pp. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/85e6fa29-3936-48ab-96c2-b0847cb780a2/content>

- Gelli, V.C., Patino, M.T.O., Rocha, J.V., Barbieri, E., Miranda-Filho, K.C. y Henriques, M.B. 2020. Production of the *Kappaphycus alvarezii* extracts as a leaf biofertilizer: technical and economic analysis for the North Coast of São Paulo-Brazil. *Boletim do Instituto de Pesca*, 46: e568. <https://doi.org/10.20950/1678-2305.2020.46.2.568>
- Gelli, V.C., Plastino, E.M. y Yokoya, N.S. 2024. Cultivation and Domestication of *Kappaphycus alvarezii* Strains at Ubatuba Bay, São Paulo State, Southeastern Brazil. En: Critchley, A.T., Hurtado, A.Q., Neish, I.C. (eds.). *Tropical Phyconomy Coalition Development*. pp. 103–112. *Developments in Applied Phycology*, Vol 11. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47806-2_9
- Gilson, F., Rodrigues L.A., New, M.B., Bueno, G.W. y Valenti, W.C. 2024. A description of the culture of tambatinga (*Colossoma macropomum* x *Piaractus brachypomus*) in a South American tropical region and the interaction of farm size with value chains. *Aquaculture Reports*, 34: e101888. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101888>
- Goes, H.G. y Reis, R.P. 2011. An initial comparison of tubular netting versus tie-tie methods of cultivation for *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Solieriaceae) on the south coast of Rio de Janeiro State, Brazil. *Journal Applied Phycology*, 23: 607–613. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9647-y>
- Goes, H.G. y Reis, R.P. 2012. Temporal variation of the growth, carrageenan yield and quality of *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Gigartinales) cultivated at Sepetiba Bay, southeastern Brazilian coast. *Journal Applied Phycology*, 24: 173–180. <https://doi.org/10.1007/s10811-011-9665-4>
- Halling, C., Aroca, G., Cifuentes, M., Buschmann, A.H. y Troell, M. 2005. Comparison of Spore inoculated and vegetative propagated cultivation methods of *Gracilaria chilensis* in an integrated seaweed and fish cage culture. *Aquaculture International*, 13(5): 409–22. <https://doi.org/10.1007/s10499-005-6977-x>
- Hayashi, L., Bulboa, C., Kradolfer, P., Soriano, G. y Robledo, D. 2014. Cultivation of red seaweeds: a Latin American perspective. *Journal of Applied Phycology*, 26: 719–727. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0143-z>
- Hayashi, L., Cantarino, S. y Critchley, A. 2020. Challenges to the future domestication of seaweeds as cultivated species: understanding their physiological processes for large-scale production. En: *Seaweeds around the world: State of art and perspectives*, 59: 57–83. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2019.11.010>
- Hayashi, L., dos Santos, A.A., Ventura, T.F.B., Landuci, F.S., Gelli, V.C. y Castelar, B. 2024. *Kappaphycus alvarezii* farming in Brazil: A brief summary and current trends. En: Critchley, A.T., Hurtado, A.Q. y Neish, I.C. (eds.). *Tropical Phyconomy Coalition Development*. pp. 113–120. *Developments in Applied Phycology*, Vol 11. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47806-2_10
- Henry-Silva, G.G., Alves, J., Flickinger, D., Gomes-Rebouças, R. y Bessa-Junior, A. 2023. Polyculture of Pacific White Shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone) and red seaweed *Gracilaria birdiae* (Greville) under different densities. *Fishes*, 8: 54. <https://doi.org/10.3390/fishes8010054>
- Levine, D.K. 2012. Production chains. *Review of Economic Dynamics*, 15: 271–282. <https://doi.org/10.1016/j.red.2012.01.003>
- Marinho-Soriano, E., Nunes, S.O., Carneiro, M.A.A. y Pereira, D.C. 2009. Nutrients' removal from aquaculture wastewater using the macroalgae *Gracilaria birdiae*. *Biomass and Bioenergy*, 33: 327–331. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.07.002>
- Marinho-Soriano, E. 2017. Historical context of commercial exploitation of seaweeds in Brazil. *Journal of Applied Phycology*, 29: 665–671. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0866-8>
- Montúfar-Romero, M., Rincones-León, R.E., Cáceres-Farias, L.B., et al. 2023. Feasibility of aquaculture cultivation of elkhorn sea moss (*Kappaphycus alvarezii*) in a horizontal long line in the Tropical Eastern Pacific. *Scientific Reports*, 13: 14751. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41795-x>

- Muñoz, C.A. 2015. Plan de Negocio de “Producción Sostenible a nivel industrial del alga parda *Macrocystis pyrifera* (huairo) em Chile, com Mercado Objetivo en la Industria Abalonera”. Trabajo de Titulación de Ingeniero Civil Industrial Universidad Austral de Chile. Puerto Montt, Chile. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2015/bpmfcim971p/doc/bpmfcim971p.pdf>
- Nogueira, M. y Henriques, M. 2020. Large-scale versus family-sized system production: economic feasibility of cultivating *Kappaphycus alvarezii* along the southeastern coast of Brazil. *Journal of Applied Phycology*, 32: 1893–1905. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02107-2>
- Pereira, S.A., Kimpara, J.M. y Valenti, W.V. 2020a. A bioeconomic analysis of the potential of seaweed *Hypnea pseudomusciformis* farming to different targeted markets. *Aquaculture Economics & Management*, 24: 507–525. <https://doi.org/10.1080/13657305.2020.1803445>
- Pereira, S.A., Kimpara, J.M. y Valenti, W.V. 2020b. A simple substrate to produce the tropical epiphytic algae *Hypnea pseudomusciformis*. *Aquacultural Engineering*, 89: e102066. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102066>
- Pereira, S., Kimpara, J. y Valenti, W. 2021. Sustainability of the seaweed *Hypnea pseudomusciformis* farming in the tropical Southwestern Atlantic. *Ecological Indicators*, 121: 107101. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107101>
- Revilla-Lovano, S., Sandoval-Gil, J.M., Zertuche-Gonzalez, J.A., Belando-Torrenes, M.D., Bernardeau-Esteller, J., Rangel-Mendoza, L.K., Ferreira-Arrieta, A., Guzman-Calderon, J.M., Camacho-Ibar, V.F., Muniz-Salazar, R. y Avila-Lopez, M.C. 2021. Physiological responses and productivity of the seaweed *Ulva ohnoi* (Chlorophyta) under changing cultivation conditions in pilot large land-based ponds. *Algal Research*, 56: e102316. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926421001351>
- Rimmer, M.A., Larson, S., Lapong, I., Purnomo, A.H., Pong-Masak, P.R., Swanepoel, L. y Paul, N.A. 2021. Seaweed aquaculture in Indonesia contributes to social and economic aspects of livelihoods and community wellbeing. *Sustainability*, 13: e10946. <https://doi.org/10.3390/su131910946>
- Rincones, R.E. y Tirado, D.A.M. 2011. Aspectos técnicos y económicos para el establecimiento comercial del maricultivo de algas en Colombia: Experiencias en la Península de La Guajira. *Ambiente y Desarrollo*; Bogotá, Colombia, Volumen XV No. 28. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/22859>
- Rincones, R.E., Campos, S.L. y Narvaéz, J.L. 2024. Aspectos técnicos de la acuicultura de macroalgas em Venezuela. *ACUIALGAS* (Unpublished).
- Robledo, D., Gasca-Leyva, E. y Fraga, J. 2013. Social and economic dimensions of carrageenan seaweed farming in Mexico. En: D. Valderrama, J. Cai, N. Hishamunda & N. Ridler, eds. *Social and economic dimensions of carrageenan seaweed farming*. Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 580. Rome, FAO. https://www.researchgate.net/publication/243544894_Social_and_economic_dimension_of_carrageenan_seaweed_farming_in_Mexico
- Robledo, D. y Domínguez-May, R. 2024. Cultivo de macroalgas tropicales em México: Perspectiva económica, financiamiento y rentabilidad. *ACUIALGAS*.
- Ruíz, J.T.D., Timote, W.J.F., Guerrero, P.M.B., Franco, M.C., Balvin, S.J.M. y Suñiga, C.A.O. 2021. Factibilidad económica de la producción de *Chondracanthus chamissoi*, cultivo vía esporas en laboratorio, San Andrés-Pisco, Perú. *Arnaldoa*, 28: 163–182. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.281.28110>
- Santos, A.A., Dorow, R., Araújo, L.A. y Hayashi, L. 2018. Socioeconomic analysis of the seaweed *Kappaphycus alvarezii* and mollusks (*Crassostrea gigas* and *Perna perna*) farming in Santa Catarina State, Southern Brazil. *Custos e @gronegocio*, 14(3): 443–472. <http://custoseagronegocioonline.com.br/numero3v14/OK%2021%20algas.pdf>

- SERNAPESCA (Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura). 2024. *Anuario Estadístico de Pesca y Acuicultura 2022*. www.sernapesca.cl. Accessed on 4 May 2024. <https://www.sernapesca.cl/informacion-utilidad/anuarios-estadisticos-de-pesca-y-acuicultura/>
- Silva, E.G., Castilho-Barros, L. y Henriques, M.B. 2022. Economic feasibility of integrated multi-trophic aquaculture (mussel *Perna perna*, scallop *Nodipecten nodosus* and seaweed *Kappaphycus alvarezii*) in Southeast Brazil: A small-scale aquaculture farm model. *Aquaculture* 552: 738031. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738031>
- Simioni, C., Hayashi, L. y Oliveira, M.C. 2019. Seaweed resources of Brazil: what has changed in 20 years? *Botanica Marina*, 62: 433–441. <https://doi.org/10.1515/bot-2019-0021>
- Soto, O.A. 2011. Cultivo de *Gigartina scottsbergii* (Luga roja) como desarrollo de idea de negocio. Trabajo de Titulación de Ingeniero Civil Industrial Universidad Austral de Chile. Puerto Montt, Chile. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2011/bpmfcis718c/doc/bpmfcis718c.pdf>
- Troell, M., Halling, C., Nilsson, A., Buschmann, A.H., Kautsky, N. y Kautsky, L. 1997. Integrated marine cultivation of *Gracilaria chilensis* (Gracilariales, Rhodophyta) and salmon cages for reduced environmental impact and increased economic output. *Aquaculture*, 156: 45–61. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(97\)00080-X](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00080-X)
- Valderrama, D., Cai, J., Hishamunda, N., Ridler, N., Neish, I.C., et al. 2015. The Economics of *Kappaphycus* seaweed cultivation in developing countries: A comparative analysis of farming systems. *Aquaculture Economics & Management*, 19: 251–277. <https://doi.org/10.1080/13657305.2015.1024348>
- Valenti, W.C., Barros, H.P., Moraes-Valenti, P. y Cavalli, R.O. 2021. Aquaculture in Brazil: past, present and future. *Aquaculture Reports*, 19, e100611. pp. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100611>
- Valenti, W.C. y Moraes-Valenti, P. 2010. Production Chain of Aquaculture. *World Aquaculture*, 41(4): 54–58. https://www.researchgate.net/publication/228444155_Production_chain_of_aquaculture
- Westermeier, H. 2011. Estudio de viabilidad económica. En: Perfil del Recurso *Lessonia trabeculata* como especie candidata para el Programa de Diversificación Acuícola (ed. Westermeier, H.), 09 PDAC-6896. Universidad Austral de Chile.
- Westermeier, H., Patiño, D.J., Murúa, P., Quintanilla, J.C., Correa, J., Buschmann, A.H. y Barros, I. 2012. A pilot-scale study of the vegetative propagation and suspended cultivation of the carragenophyte alga *Gigartina skottsbergii* in southern Chile. *Journal of Applied Phycology*, 24: 11–20. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9640-5>
- World Bank. 2023. Global Seaweed New and Emerging Markets. Problue. The World Bank. 208 pp. <https://www.worldbank.org/en/topic/environment/publication/global-seaweed-new-and-emerging-markets-report-2023>
- Yoshimura, C.Y., Cunha, S.R. y Oliveira, E.C. 2006. Testing Open-Water Cultivation Techniques to *Gracilaria domingensis* (Rhodophyta, Gracilariales) in Santa Catarina, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 1290–93. <https://www.jstor.org/stable/25742961>
- Zuniga-Jara, S., Marín-Riffo, M.C. y Bulboa-Contador, C. 2016. Bioeconomic analysis of giant kelp *Macrocystis pyrifera* cultivation (Laminariales; Phaeophyceae) in northern Chile. *Journal of Applied Phycology*, 28: 405–416. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0581-x>
- Zuniga-Jara, S. y Soria-Barreto, K. 2018. Prospects for the commercial cultivation of macroalgae in northern Chile: the case of *Chondracanthus chamissoi* and *Lessonia trabeculate*. *Journal of Applied Phycology*, 30: 1135–1147. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1298-9>
- Zuniga-Jara, S. y Contreras, C. 2020. An economic valuation of the commercial cultivation of *Agarophyton chilensis* in northern Chile. *Journal of Applied Phycology*, 32: 3233–3242. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02165-6>
- Zuniga-Jara, S., Soria-Barreto, K. y Godoy-Alfaro, D. 2022. Economic valuation of the commercial aquaculture of *Sarcopeltis skottsbergii* in Southern Chile. *Journal of Applied Phycology*, 34: 2645–2655. <https://doi.org/10.1007/s10811-022-02710-5>

ESTUDIOS DE CASOS

Perspectivas para la alimentación: uso de macroalgas cultivadas en Chile para la alimentación humana

Cristian Rogel-Castillo,¹ Andrea Donoso-Youlton,¹ Cristian Bulboa-Contador² y Cristian Agurto-Muñoz¹

¹ Universidad de Concepción, Concepción, Chile

² Universidad Andrés Bello, Concepción, Chile

Rogel-Castillo, C., Donoso-Youlton, A., Bulboa-Contador, C. y Agurto-Muñoz, C. 2025. *Perspectivas para la alimentación: uso de macroalgas cultivadas en Chile para la alimentación humana*. En: Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Murúa Andrade, P. y Farías Molina, A. (coords.). Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 24-26 de junio de 2024, Puerto Varas, Chile. *FAO Actas de Pesca y Acuicultura*. N.º 74. Roma, FAO. pp. 149-156.

RESUMEN

La gran diversidad de macroalgas presentes en las costas de Chile constituye una fuente prometedora de alimentos funcionales y nutraceuticos, gracias a su riqueza en nutrientes esenciales y compuestos bioactivos. Este documento analiza el potencial y las principales limitaciones asociadas al cultivo de las cinco especies de macroalgas chilenas más relevantes en la alimentación humana: *Durvillaea antarctica*, *Porphyra* sp., *Callophyllis variegata*, *Chondracanthus chamissoi* y *Ulva* spp., destacando sus beneficios para la salud en la prevención de enfermedades crónicas no transmisibles. A pesar de su gran potencial, la explotación de estas macroalgas en Chile se ha limitado a la extracción de ficoloides y a la exportación de biomasa seca, con un escaso desarrollo de productos alimentarios. Se identifican carencias en la cadena de producción, como la calidad de la materia prima, la estacionalidad de las cosechas, la baja diversificación productiva y el desconocimiento de los beneficios de las macroalgas. Asimismo, se destacan las principales iniciativas nacionales centradas en el cultivo de estas especies y a la promoción de su consumo. Finalmente, se subraya la necesidad de fomentar el cultivo de macroalgas comestibles para garantizar la sostenibilidad de la industria alguera nacional.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existe una amplia evidencia sobre los beneficios del consumo de macroalgas para la salud humana. En los últimos años, estas han sido reconocidas como una de las fuentes sostenibles más prometedoras de materia prima para la elaboración de alimentos funcionales y nutraceuticos, contribuyendo a la prevención de enfermedades crónicas no transmisibles. Destacan especialmente en la prevención de afecciones relacionadas con el sobrepeso y la obesidad, como la hiperglucemia, la diabetes y las enfermedades cardiovasculares, entre otras (Tavares *et al.*, 2023). Estos beneficios se deben a la presencia de diversos nutrientes esenciales y compuestos bioactivos, entre ellos carbohidratos (fibra dietaria), proteínas (aminoácidos esenciales), lípidos (ácidos grasos n-3 y n-6), minerales y vitaminas esenciales (Rogel-Castillo *et al.*, 2023). Por tanto, las macroalgas comestibles pueden desempeñar un papel clave

como coadyuvantes en el manejo de los factores de riesgo asociados a enfermedades crónicas no transmisibles, ya sea en forma de alimentos funcionales o nutraceuticos. En consecuencia, numerosas investigaciones se han centrado en el estudio de compuestos bioactivos presentes en las algas comestibles y sus beneficios para la salud. Entre estos componentes destacan los polisacáridos aislados (como el alginato y el fucoídano), proteínas (como las ficobiliproteínas), los polifenoles (como los florotaninos), los carotenoides (como la fucoxantina) y los ácidos grasos poliinsaturados omega 3 (como el ácido eicosapentaenoico) (Cherry *et al.*, 2019; Choudhary, Chauhan y Mishra, 2021; Rogel-Castillo *et al.*, 2023).

Especies de interés

Las costas chilenas albergan una gran diversidad de macroalgas. En la actualidad, cinco especies destacan por su potencial en la alimentación humana: *Durvillaea antarctica* o *incurvata* (Cochayuyo), *Porphyra* spp. (Luche), *Callophyllis variegata* (Carola), *Chondracanthus chamissoi* (Chicoria de mar) y *Ulva* spp. (Lechuga de mar). Gracias a iniciativas nacionales como el proyecto “Nutrimar Bio-Bío: Innovación en alimentos algales”, se ha recopilado información valiosa sobre el valor nutricional de estas macroalgas comestibles en Chile (Cuadro 1), así como sobre su contribución a la salud humana en función de su riqueza en compuestos bioactivos.

En Chile, el potencial de las macroalgas comestibles ha sido escasamente aprovechado, limitándose su aplicación principalmente a la extracción de ficocoloides (agar, colagar, carregina y alginato) y a la exportación masiva de biomasa seca para consumo humano y animal. El proyecto Nutrimar Bio-Bío (www.nutrimarbiobio.cl) identificó y abordó las principales limitaciones que explican el bajo consumo de macroalgas en el país. Estas barreras están relacionadas, principalmente, con la cadena de producción, desde la recolección de macroalgas hasta su incorporación en productos alimentarios, así como con el desconocimiento de sus beneficios por parte de la sociedad. En la etapa de recolección destacan problemas de calidad de la materia prima, como altos niveles de humedad, daños por herbívoros y presencia de epífitos, factores que afectan negativamente su calidad nutricional. En cuanto a las empresas comercializadoras o transformadoras, se observa una discontinuidad en las cosechas a lo largo del año (estacionalidad), una escasa diversificación productiva y un número limitado de mercados de destino. Por último, el lento crecimiento de la industria dedicada a la elaboración de alimentos y nutraceuticos a base de macroalgas se debe, principalmente, al desconocimiento y a la falta de sensibilización de la población sobre los beneficios de su consumo (Figura 1).

CUADRO 1

Valor nutricional de las principales macroalgas comestibles presentes en Chile

Valor nutricional (100 g)	<i>Durvillaea antarctica/Durvillaea incurvata</i> (g)	<i>Porphyra</i> sp./ <i>Pyropia</i> sp. (g)	<i>Callophyllis variegata</i> (g)	<i>Chondracanthus chamissoi</i> (g)	<i>Ulva</i> spp. (g)
Carbohidratos totales	50–60	36–47	40–45	47	53
Carbohidratos disponibles	5–6	0,1–5,2	2–4	0,1	7
Fibra dietética	45–55	31–47	36–41	46,9	46
Proteínas	6–12	27–43	20–28	10–16	11
Lípidos totales	0,1–5	0,5–1,5	0,1–0,9	0,1–0,5	2

Fuentes: Agurto-Muñoz, C. y Rogel-Castillo, C. 2020. Proyecto FIC-R BIP 40026757-0 Nutrimar Bio-Bío: Innovación en Alimentos Algales. Concepción, Chile. Astorga-España, M.S., Galdón, B.R., Rodríguez, E.R. y Romero, C.D. 2015. Mineral and trace element concentrations in seaweeds from the sub-Antarctic ecoregion of Magallanes (Chile). *Journal of Food Composition and Analysis*, 39: 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2014.11.010>. Quiral, V., Morales, C., Sepúlveda, M. y Schwartz, M. 2012. Propiedades nutritivas y saludables de algas marinas y su potencialidad como ingrediente funcional. *Revista chilena de nutrición*, 39(4): 196–202. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182012000400014>



Uno de los principales obstáculos que ralentizan el desarrollo del sector es la ausencia de tecnologías de cultivo industrial, tanto en mar como en tierra. En Chile, la producción de algas marinas se basa mayoritariamente en la explotación de bancos naturales intermareales y submareales, siendo la única especie cultivada *Gracilaria chilensis*. Sin embargo, esta no se destina a la alimentación, sino a la producción de ficocoloides, con un bajo nivel de manufactura y precios reducidos y muy variables. Esta situación se ha mantenido durante décadas, lo que ha generado la necesidad de implementar medidas de regulación legal en estas pesquerías debido a la constante presión extractiva, así como la puesta en marcha de programas gubernamentales para incentivar y subvencionar el repoblamiento con el fin de garantizar la disponibilidad de macroalgas cosechables. En este contexto, Oyarzo-Miranda *et al.* (2023) informan de que la mayor parte de la inversión pública se ha destinado a planes y proyectos productivos orientados al cultivo de macroalgas marinas. Esto incluye subvenciones para el mantenimiento de los cultivos de *Gracilaria chilensis*, así como estudios dirigidos al desarrollo de nuevas tecnologías que permitan incorporar otras especies a actividades acuícolas. En cambio, la inversión en programas de repoblamiento, orientados a conservar o reponer las poblaciones naturales bajo regímenes de explotación, ha sido significativamente menor. Estas diferencias reflejan que, en el período 2017–19, se destinaron 1,7 millones de USD a actividades, programas y proyectos de cultivo, frente a solo 19 000 USD en programas de repoblamiento (Oyarzo-Miranda *et al.*, 2023).

En este contexto, la explotación o cultivo comercial de macroalgas para consumo humano es prácticamente inexistente. Solo en casos aislados y de forma esporádica se comercializan macroalgas para la industria alimentaria, con una demanda procedente casi exclusivamente de Asia.

En cuanto a las macroalgas más consumidas a nivel nacional, en el caso de *Durvillaea incurvata* o *antarctica*, se han llevado a cabo algunos proyectos de investigación aplicada con el objetivo de avanzar en: (i) la producción de plántulas en sistemas de cultivo interior (*indoor*), (ii) repoblamiento mediante la instalación de plántulas en zonas intermareales (Paredes-Mella *et al.*, 2024) y, (iii) el cultivo en mar de la especie (Cuadro 2). No obstante, en la actualidad su producción sigue dependiendo de la extracción desde bancos naturales. Esta macroalga tiene un gran potencial culinario,

un aspecto que ya ha sido explorado por empresas locales como KollofKen, Quelp y Seaweed Place, que han incorporado esta especie en distintos formatos, dirigidos a un nicho de consumidores de comida saludable.

En el caso de los géneros *Pyropia* o *Porphyra* (Luche o Nori), si bien las tecnologías de cultivo pueden adaptarse a partir de la experiencia de países asiáticos, su aplicación en Chile presenta una mayor complejidad debido a la alta diversidad de estas especies pertenecientes a los géneros *Porphyra*, *Pyropia*, *Fucusifolium* y *Wildenmania* (Guillemin *et al.*, 2016). Muchas de estas especies coexisten estrechamente en los roqueríos (Meynard *et al.*, 2019), lo que dificulta su reconocimiento e identificación. Esta situación hace imprescindible una correcta identificación de la especie antes de cualquier intento de cultivo, ya que el uso de mezclas podría afectar negativamente el desarrollo de las tecnologías. En esta línea, recientemente Piña *et al.*, (2023) ha llevado a cabo la primera caracterización biológica tras reconocer esta gran diversidad, logrando completar el ciclo de vida en laboratorio de *Pyropia orbicularis*.

En la década pasada, se implementaron ciclos de producción de nori (luche) en el sur de Chile, hasta la obtención de láminas listas para su comercialización (Cuadro 2). Este proceso demostró la viabilidad de adaptar las tecnologías disponibles a nivel mundial a las especies locales, aunque en aquel momento solo se identificaban como *Porphyra* spp. No obstante, cualquier intento futuro de desarrollo del cultivo deberá considerar la alta diversidad de especies actualmente identificadas.

El alga roja *C. chamissoi* es, posiblemente, la especie comestible que más atención ha recibido para el desarrollo de su producción acuícola y, al mismo tiempo, una de las mejor perfiladas para lograrlo a corto plazo. Diversos estudios han abordado aspectos biológicos y tecnológicos que abarcan toda la cadena de producción acuícola, desde la obtención de semillas hasta el cultivo en el mar mediante diferentes tecnologías (Bulboa *et al.*, 2013; 2020; Macchiavello *et al.*, 2018; Oyarzo *et al.*, 2021). Este interés ha sido impulsado por el elevado precio que puede alcanzar en mercados internacionales cuando se comercializa como alimento humano (~30 USD/kg) (Bulboa *et al.*, 2020).

En esta especie se han desarrollado proyectos tecnológicos relacionados con la transformación de la biomasa, estrategias de reproducción orientadas a la producción y modelos de acuicultura asociativa con comunidades costeras (Cuadro 2). Todo ello posiciona a *C. chamissoi* como una candidata prometedora para la producción de biomasa cultivada en los próximos años. Una ventaja singular de esta especie es su capacidad de propagarse mediante discos de fijación secundaria, una característica presente solo en algunos representantes del orden Gigartinales. Este mecanismo ha facilitado el proceso de cultivo a través de estos propágulos multicelulares desde su descubrimiento (Bulboa *et al.*, 2013), siendo, posiblemente, la única especie en el mundo cuya tecnología de producción se basa en esta estrategia. Por otro lado, las principales barreras identificadas están relacionadas con la calidad de la biomasa destinada al consumo humano, que se ve afectada por la presencia de epifitos adheridos a los talos y por las variaciones estacionales, lo que ha ralentizado su escalamiento productivo.

De igual forma, aunque a menor escala, se han llevado a cabo estudios para avanzar en la domesticación de *C. variegata*, otra especie con un alto valor comercial en el mercado de los alimentos. Se han realizado estudios biológicos y poblacionales, así como observaciones sobre sus vías de reproducción (Hernández-González *et al.*, 2010; Ávila, Piel y Alcapan, 2014; Westermeier *et al.*, 2020). Sin embargo, a pesar de estos avances, las bases para el escalamiento del cultivo de esta especie aún no están disponibles.

En Chile, a diferencia de lo que ocurre en otras regiones, ninguna especie del género *Ulva* se consume ni se comercializa, por lo que apenas existen evidencias de intentos de cultivo. A nivel nacional, hasta la fecha, solo se ha documentado un caso exitoso de sistemas de cultivo interior (*indoor*) para *Ulva* spp. (Agurto-Muñoz *et al.*, 2014), orientado a diversas aplicaciones biotecnológicas. Recientemente, se ha estudiado la taxonomía de este género en el litoral central de Chile, un aspecto que no había

CUADRO 2

Ejemplos de proyectos de Investigación, desarrollo e innovación nacionales financiados con fondos públicos, con enfoque en el cultivo de macroalgas comestibles

Nombre	Código	Fuente de financiamiento en Chile
Desarrollo de la tecnología de cultivo de <i>Durvillaea antarctica</i> en <i>hatchery</i> y evaluación de técnicas de repoblamiento de juveniles en áreas de manejo	AF10I1384	ANID
Desarrollo y producción de encapsulados de embriones de las algas pardas <i>Durvillaea incurvata</i> y <i>Lessonia berteroana</i> , para su aplicación en estrategias de repoblamiento en zonas intermareales	ID21I10054	ANID
Desarrollo tecnológico en la fijación y asentamiento de carposporas de <i>Chondracanthus chamissoi</i> , un alga comestible del sur de Chile	IT14I10126	ANID
Desarrollo del cultivo masivo de la chicoria (<i>Chondracanthus chamissoi</i>) en la zona central y sur de Chile	D06I1058	ANID
Alternativas tecnológicas para el cultivo de <i>C. chamissoi</i> en la zona norte de Chile a partir de discos de fijación secundaria	AQ08I1028	ANID
Producción de semillas de <i>Chondracanthus chamissoi</i> : cerrando el ciclo productivo para la acuicultura de la chicorea de mar	IT23I0015	ANID
Biología y cultivo del alga roja comestible <i>Callophyllis variegata</i> en el sur de Chile	D08I1067	ANID
Estudio de factibilidad, cultivo y procesamiento del luche chileno para producción comercial de <i>Nori</i> . Escalamiento productivo en el mar	30234872-0	FIC Región de Los Lagos - Fondo Regional

Nota: La Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) es el organismo encargado de administrar y ejecutar los programas e instrumentos destinados a promover, fomentar y desarrollar la investigación en todas las áreas del conocimiento, el desarrollo tecnológico y la innovación de base científico-tecnológica, conforme a las políticas definidas por el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

sidio analizado con anterioridad (Mutizabal-Aros *et al.*, 2024). De manera similar a lo descrito para especies de los géneros *Porphyra* y *Pyropia*, en este caso coexisten varias entidades de *Ulva* morfológicamente muy similares, que proliferan en grandes cantidades y generan *green tides* (mareas verdes), lo que dificulta su reconocimiento y clasificación sin el uso de herramientas moleculares.

Existen dos factores que limitan significativamente el consumo de macroalgas en Chile. Por un lado, el desconocimiento de la población sobre sus propiedades nutricionales y beneficios para la salud; por otro, sus características sensoriales no deseadas, como el olor y el sabor. Un estudio realizado en 2019 por la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (SUBPESCA) determinó que el consumo promedio anual de productos marinos por persona en Chile alcanzó los 14,9 kg, de los cuales solo 0,19 kg correspondían a algas (SUBPESCA, 2019), probablemente *D. antarctica* y *Porphyra* spp., que son las que más se consumen en el país. Para contrarrestar los mitos negativos sobre el consumo de macroalgas e incrementar su baja aceptación, en las últimas dos décadas se han impulsado diversos proyectos promovidos por organismos públicos y privados.

En 2012 el proyecto “Uso y Aplicaciones de Algas Marinas Chilenas para Consumo Humano” (Cortes Guajardo, 2012) promovió el consumo de macroalgas marinas chilenas a través de la introducción de nuevos productos alimentarios elaborados con especies de la región de Los Lagos, como *C. variegata*, *C. chamissoi*, *D. antarctica* y *Porphyra* spp. La iniciativa incluyó: la selección de praderas naturales de macroalgas y su cosecha; la caracterización nutricional de las especies seleccionadas; el desarrollo de productos alimentarios innovadores, como barritas energéticas y otros *snacks*; la organización de talleres de capacitación y creación de recetas dulces y saladas a base de macroalgas; y la capacitación de las y los pescadores artesanales para añadir valor a sus productos, mejorando sus ingresos y su calidad de vida.

En el año 2015, el proyecto “Incorporación de la Industria Alimentaria de Consumo Humano Directo como Fuente de Agregación de Valor para las Macroalgas Nacionales” (Muñoz, 2015) analizó los aspectos económicos de la introducción de las algas chilenas, particularmente *D. antarctica*, *C. chamissoi*, *Porphyra* spp., *C. variegata* y *Ulva* spp., en los mercados nacionales e internacionales. Los resultados demostraron que en Chile las macroalgas se recolectaban mediante pesca artesanal y se destinaban al consumo humano directo tras procesos de secado tradicionales, como el secado al sol en playas. A pesar de que en Chile existe una regulación considerable sobre la recolección, el cultivo y la comercialización de las macroalgas, se evidenciaron deficiencias en todas las fases de producción. Por ello, una de las conclusiones fue la necesidad de implementar prácticas sostenibles para aumentar el cultivo de algas comestibles. En resumen, el estudio identificó dificultades para expandir el uso de las algas marinas chilenas tanto a nivel nacional como internacional, entre ellas la escasa incorporación de estas en la producción de alimentos.

En la Región de Coquimbo se han desarrollado dos proyectos centrados en la utilización de macroalgas: el primero durante el año 2016 correspondió al proyecto “Transferencia de Tecnología para el desarrollo de Cocina Patrimonial y de Autor en base a Algas y Productos Marinos de la Región de Coquimbo” (Álvarez, 2017). Este proyecto se enfocó en la transferencia de tecnología para desarrollar una cocina basada en macroalgas y productos marinos. Su objetivo fue educar a los restaurantes en técnicas innovadoras para diversificar sus menús y promover los platos con macroalgas, lo que les permitió obtener un sello especial. Como parte del proyecto, los restaurantes participaron en talleres de cocina donde aprendieron técnicas de preparación de macroalgas, que posteriormente incluyeron en sus menús para ofrecer a los clientes una experiencia gastronómica única.

El otro proyecto, desarrollado durante el 2017 “Nodo de comercialización de productos de origen algal como alimento funcional en la región de Coquimbo”, tuvo como objetivo promover el consumo de alimentos a base de macroalgas. Esto se logró educando a la población sobre sus beneficios nutricionales y proporcionando recetas prácticas. Como resultado, se crearon nuevas estrategias de marketing para apoyar a los productores y recolectores de macroalgas de la región de Coquimbo. El proyecto culminó con la publicación de un libro de cocina titulado “Comiendo Algas: Recetas de Cocina” (Álvarez, Uribe y Tala, 2018) y un “Manual de buenas prácticas de recolección y manipulación de algas para el consumo alimentario” (Álvarez y Uribe, 2018).

Desde 2020, uno de los últimos proyectos en el área de la promoción del consumo de macroalgas, es “Nutrimar Bío-Bío: Innovación en Alimentos Algales” (Agurto-Muñoz y Rogel-Castillo, 2020), desarrollado en la región del Bío-Bío. Este proyecto se enfocó en promover el consumo de algas marinas mediante su integración en alimentos saludables y productos nutraceuticos, con el objetivo de crear nuevos negocios y mercados utilizando las algas *D. antarctica*, *Ulva* spp., *C. chamissoi*, *Pyropia* spp., *P. columbina* y *C. variegata*. Entre los resultados del proyecto destacan el desarrollo de prototipos de alimentos funcionales, como aperitivos, pan y galletas a base de *Ulva* spp., y productos nutraceuticos, como cápsulas blandas elaboradas con algas marinas. Además, se implementaron talleres para la población en general, capacitaciones para organizaciones y estudiantes, un recetario, talleres de cocina, fichas nutricionales y seminarios comunitarios sobre macroalgas comestibles. Debido al éxito y la recepción positiva por parte de la comunidad y de los protagonistas de la cadena de producción de la industria alguera, el proyecto continúa durante el período 2024-26 con “Nutrimar: Creando una Cultura Algal para el Bío-Bío”. En esta ocasión, uno de los principales objetivos es promover e incentivar el consumo de productos marinos, especialmente en el ámbito escolar, buscando crear una demanda que active un nicho de mercado más competitivo a nivel nacional.

Finalmente, a pesar de los distintos esfuerzos por fomentar el consumo de macroalgas, se señala que la principal barrera para el desarrollo de una industria consolidada en el sector de los alimentos funcionales y nutraceuticos a base de macroalgas es la escasa o nula capacidad de cultivo de macroalgas comestibles, tanto en tierra como en el mar. Es fundamental orientar los esfuerzos en esa dirección para, además, dar a conocer a la población las propiedades nutricionales y los beneficios para la salud de las macroalgas. Al mismo tiempo, es necesario reducir o eliminar las características sensoriales no deseadas (olor y sabor) en matrices alimentarias de consumo masivo y fácil procesamiento. Por esta razón, la innovación y el emprendimiento de base biotecnológica son herramientas clave para atraer financiación y aportar valor añadido, diversificando el uso de las macroalgas y fomentando el desarrollo de tecnologías de cultivo. Asimismo, resulta esencial actuar en el ámbito escolar para generar nichos de mercado y aumentar la demanda de alimentos base de macroalgas, garantizando su calidad, seguridad alimentaria y, sobre todo, la sostenibilidad de la industria alguera nacional.

REFERENCIAS

- Agurto-Muñoz, C., Maldonado Mendoza, A., Farias Campos, J., Yarur Paez, P., Troncoso Valenzuela, M., Alveal Villena, K., Troncoso Leon, N. y San Martín Parraguez, S. 2014. Método de cultivo de macroalga verde *Ulva* sp., que permite la obtención de cantidad industrial de biomasa libre de contaminantes (Patente No. 58465). INAPI Chile.
- Agurto-Muñoz, C. y Rogel-Castillo, C. 2020. Proyecto FIC-R BIP 40026757-0 Nutrimar Bío-Bío: Innovación en Alimentos Algaes. Concepción, Chile.
- Álvarez, G. 2017. Transferencia de Tecnología Para el Desarrollo de Cocina Patrimonial y de Autor en Base a Algas y Productos Marinos de la Región de Coquimbo. Proyecto PYT 16PDTR-70425 Coquimbo, Chile, 2017
- Álvarez, G., Uribe, E. y Tala, F. 2018. *Comiendo Algas. Recetas de Cocina*. Proyecto 15NODO-48706-2. Nodo de comercialización de productos de origen algal como alimento funcional en la región de Coquimbo. Coquimbo, Chile
- Álvarez, G. y Uribe, E. 2018. *Manual de buenas prácticas de recolección y manipulación de algas para el consumo alimentario*. Proyecto 15NODO-48706-2. Nodo de comercialización de productos de origen algal como alimento funcional en la región de Coquimbo. Coquimbo, Chile.
- Ávila, M., Piel, M.I. y Alcapan, A. 2014. Indoor and outdoor culture of *Callophyllis variegata* (Bory) Kützinger (Gigartinales, Rhodophyta) in southern Chile. *Journal of applied phycology*, 26: 769–774. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-013-0109-1>
- Bulboa, C., Véliz, K., Sáez, F., Sepúlveda, C., Vega, L. y Macchiavello, J. 2013. A new method for cultivation of the carragenophyte and edible red seaweed *Chondracanthus chamissoi* based on secondary attachment disc: Development in outdoor tanks. *Aquaculture*, 410: 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.06.018>
- Bulboa Contador, C., Massad, I.P., Contreras-Porcía, L., Zapata, J., Castañeda, F., Ramírez, M.E. y Gil-Kodaka, P. 2020. Concise review of genus *Chondracanthus* (Rhodophyta: Gigartinales). *Journal of applied phycology*, 32: 773–785. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-019-01956-w>
- Cherry, P., O'Hara, C., Magee, P.J., McSorley, E.M. y Allsopp, P.J. 2019. Risks and benefits of consuming edible seaweeds. *Nutrition Reviews*, 77(5): 307–329. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuy066>
- Choudhary, B., Chauhan, O.P. y Mishra, A. 2021. Edible seaweeds: a potential novel source of bioactive metabolites and nutraceuticals with human health benefits. *Frontiers in Marine Science*, 8: 740054. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.740054>
- Cortes Guajardo, M.A. 2012. *Uso y Aplicaciones de Algas Marinas Chilenas para Consumo Humano; FIC Región de Los Lagos* 30128359. Puerto Montt, Chile.

- Guillemin, M.L., Contreras-Porcía, L., Ramírez, M.E., Macaya, E.C., Contador, C.B., Woods, H., Wyatt, C. y Brodie, J. 2016. The bladed *Bangiales* (Rhodophyta) of the South Eastern Pacific: molecular species delimitation reveals extensive diversity. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 94: 814–826. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2015.09.027>
- Hernández-González, M.D.C., Aroca, G., Furci, G., Buschmann, A.H., Filun, L. y Espinoza, R. 2010. Population dynamics and culture studies of the edible red alga *Callophyllis variegata* (Kallymeniaceae). *Phycological research*, 58(2): 108–115. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1835.2010.00568.x>
- Macchiavello, J., Sepúlveda, C., Basaure, H., Sáez, F., Yañez, D., Marín, C. y Vega, L. 2018. Suspended culture of *Chondracanthus chamissoi* (Rhodophyta: Gigartinales) in Caleta Hornos (northern Chile) via vegetative propagation with secondary attachment discs. *Journal of applied phycology*, 30: 1149–1155. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-017-1307-z>
- Meynard, A., Zapata, J., Salas, N., Betancourt, C., Pérez-Lara, G., Castañeda, F., Ramírez, M.E., et al. 2019. Genetic and morphological differentiation of *Porphyra* and *Pyropia* species (Bangiales, Rhodophyta) coexisting in a rocky intertidal in Central Chile. *Journal of Phycology*, 55(2): 297–313. <https://doi.org/10.1111/jpy.12829>
- Muñoz, J.A. 2015. Incorporación de la Industria Alimentaria de Consumo Humano Directo Como Fuente de Agregación de Valor Para las Macroalgas Nacionales. Proyecto FIPA 2014-37. Iquique, Chile.
- Mutizabal-Aros, J., Ramírez, M.E., Haye, P.A., Meynard, A., Pinilla-Rojas, B., Núñez, A., Latorre-Padilla, N., et al. 2024. Morphological and Molecular Identification of *Ulva* spp. (Ulvophyceae; Chlorophyta) from Algarrobo Bay, Chile: Understanding the Composition of Green Tides. *Plants*, 13(9): 1258. <https://doi.org/10.3390/plants13091258>
- Oyarzo, S., Ávila, M., Alvear, P., Remonsellez, J.P., Contreras-Porcía, L. y Bulboa, C. 2021. Secondary attachment disc of edible seaweed *Chondracanthus chamissoi* (Rhodophyta, Gigartinales): Establishment of permanent thalli stock. *Aquaculture*, 530: 735954. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735954>
- Oyarzo-Miranda, C., Otaíza, R., Bellorín, A., Vega, J.M., Tala, F., Lagos, N., Oyarzún, F., et al. 2023. Seaweed restocking along the Chilean coast: History, present, and inspiring recommendations for sustainability. *Frontiers in Marine Science*, 9: 2719. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1062481>
- Paredes-Mella, J., Oroz, L., Gutiérrez, A., Zúñiga, A., Martínez, C., Villarroel, A., Varela, D. y Henríquez-Antipa, L. 2024. Experimental transplantation of *Durvillaea incurvata* in southern Chile: implication for its restocking. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 52(1): 174–180. <http://dx.doi.org/10.3856/vol52-issue1-fulltext-3097>
- Piña, F., Núñez, A., Araya, M., Rivas, J., Hernández, C., Bulboa, C. y Contreras-Porcía, L. 2023. Controlled cultivation of different stages of *Pyropia orbicularis* (Rhodophyta; Bangiales) from the South Pacific coast. *Aquaculture Reports*, 30: 101594. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101594>
- Rogel-Castillo, C., Latorre-Castañeda, M., Muñoz-Muñoz, C. y Agurto-Muñoz, C. 2023. Seaweeds in Food: Current Trends. *Plants*, 12(12): 2287. <https://doi.org/10.3390/plants12122287>
- SUBPESCA (Subsecretaría de Pesca y Acuicultura). 2019. Nuevo estudio: chilenos consumen anualmente casi 15 kilos de productos del mar. <https://www.subpesca.cl/portal/617/w3-article-110587.html> [Consultado el 4 de marzo de 2025].
- Tavares, J.O., Cotas, J., Valado, A. y Pereira, L. 2023. Algae food products as a healthcare solution. *Marine Drugs*, 21(11): 578. <https://doi.org/10.3390/md21110578>
- Westermeier, R., Murúa, P., Robles, M., Barría, M., Patiño, D.J., Muñoz, L. y Müller, D.G. 2020. Population biology and chemical composition of the red alga *Callophyllis variegata* (Rhodophyta; Cryptonemiales) in southern Chile. *Journal of Applied Phycology*, 32: 2505–2513. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-019-01988-2>

Utilización de macroalgas para la extracción de ficocoloides en la Argentina

Melanie Hebe Hughes

*Universidad Nacional del Sur
Bahía Blanca, Argentina*

Hughes, M.H. 2025. *Utilización de macroalgas para la extracción de ficocoloides en la Argentina*. En: Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Murúa Andrade, P. y Farías Molina, A. (coords.). Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 24-26 de junio de 2024, Puerto Varas, Chile. *FAO Actas de Pesca y Acuicultura*. N.º 74. Roma, FAO. pp. 157-166.

RESUMEN

Actualmente, la materia prima para la industria de ficocoloides a nivel global proviene en su mayoría de cultivos desarrollados en Asia, principalmente de las carragenófitas *Kappaphycus* y *Euचेuma* (27 % de la biomasa algal cultivada) y de la agarófito *Gracilaria* (21 %). En contraste, en América Latina la biomasa proviene mayormente de poblaciones naturales, excepto un pequeño porcentaje correspondiente a cultivos de *Gracilaria chilensis*. En la Argentina, la industria de ficocoloides comenzó en la década de los años 50 y alcanzó su máxima productividad entre las décadas de 1960 y 1980. La industria se centró en la extracción de agar de *Gracilaria* y carragenanos de *Sarcopeltis*, cosechadas a partir de arribazones. Hacia el año 2000 se registró una disminución de la biomasa cosechable y, en la actualidad, no se registra producción en el país. Aunque se han realizado numerosos estudios sobre diferentes aspectos de las especies productoras de ficocoloides en la Argentina, las experiencias de cultivo se reducen a escasos estudios *in vitro* y a escala piloto. Para lograr un desarrollo sostenible de la industria de los ficocoloides, es fundamental desarrollar técnicas de cultivo adaptadas a las condiciones climáticas de cada región, implementar planes de manejo del recurso y agregar valor a la biomasa en origen.

INTRODUCCIÓN

La producción mundial de ficocoloides alcanza aproximadamente las 93 035 toneladas, generando un total de 1 058 millones de USD (Porse y Rudolph, 2017). Este documento revisa los principales hidrocoloides de macroalgas y analiza el panorama actual de la industria, con especial atención a las fuentes de biomasa utilizadas y al caso de la Argentina.

FICOCOLOIDES

Los hidrocoloides son polisacáridos y proteínas que la industria utiliza como espesantes, gelificantes, estabilizantes, inhibidores de la formación de cristales y controladores de la liberación de sabores. El término ficocoloide hace referencia a los hidrocoloides provenientes de las macroalgas, que son polisacáridos presentes en la matriz amorfa de la pared celular. Los más relevantes a nivel comercial son el agar, los carragenanos y los alginatos.

Agar

El agar es un galactano sulfatado compuesto por agarosa y agarpectina, aunque en realidad es una mezcla compleja de polisacáridos. Su estructura consiste en cadenas lineales de unidades alternantes de β -D-galactopiranosas unidas en posición 3 y de α -L-galactopiranosas unidas en posición 4 (Rodríguez *et al.*, 2009). La presencia de 3,6-anhidrogalactosa y otros sustituyentes, modifica sus propiedades fisicoquímicas y, por lo tanto, su funcionalidad. En la industria alimentaria, el agar se usa como gelificante (INS 406 según el *Codex Alimentarius*) en productos de repostería, cárnicos, lácteos, bebidas y otros alimentos. El agar de mayor calidad se usa en microbiología como medio de cultivo. La obtención de agar proviene principalmente de los órdenes Gracilariales y Gelidiales (Rhodophyta): el de calidad bacteriológica se extrae de especies del género *Gelidium*, mientras que el de uso alimentario se obtiene mayormente del género *Gracilaria*.

Carragenanos

Los carragenanos, al igual que el agar, son galactanos sulfatados, en este caso polímeros lineales de unidades alternantes de β -D-galactopiranosas unidas en posición 3 y de α -D-galactopiranosas unidas en posición 4 (Rodríguez *et al.*, 2009). La presencia de 3,6-anhidrogalactosa y la cantidad y posición de grupos sulfato permite clasificar a los carragenanos en distintos tipos, siendo los más relevantes comercialmente los kappa, iota, lambda y los híbridos kappa/iota o kappa II. Los carragenanos kappa y iota forman geles con distintas características, mientras que el lambda no gelifica. Se utilizan principalmente en la industria alimentaria (INS 407, 407a) como gelificantes, espesantes o estabilizantes en alimentos acuosos, productos cárnicos y lácteos. También se emplean para la fabricación de dentífricos, alimento para mascotas, pinturas y otros productos. Los carragenanos se extraen de especies del orden Gigartinales (Rhodophyta). Las especies tropicales *Kappaphycus alvarezii* y *Eucheuma denticulatum* producen carragenanos casi exclusivamente kappa y iota, respectivamente. En ciertas especies de aguas frías, como *Sarcopeltis skottsbergii*, los gametofitos producen carragenanos híbridos kappa/iota, mientras que los esporofitos producen carragenanos lambda.

Alginatos

Los alginatos son una familia de copolímeros binarios lineales de ácido β -D-manurónico (M) y de ácido α -L-gulurónico (G) unidos por enlaces glicosídicos 1 \rightarrow 4, formando bloques M, bloques G y bloques MG (Gomez *et al.*, 2009). La composición y secuencia de monómeros puede ser muy variada, influyendo en sus propiedades y aplicaciones. Son usados por su capacidad espesante, estabilizante, gelificante y formadora de películas principalmente en la industria alimentaria (INS 400–405), aunque también se los emplea en la industria textil (fabricación de tinta), en medicina, en farmacéutica, y más recientemente en biotecnología para encapsulación de células. Los alginatos se obtienen de macroalgas pardas de los órdenes Fucales y Laminariales (Ochrophyta). Los géneros *Ascophyllum*, *Durvillaea*, *Ecklonia*, *Saccharina*, *Lessonia* y *Macrocystis* presentan buenos rendimientos y calidad de estos hidrocoloides.

LA INDUSTRIA DE FICOCOLOIDES A NIVEL GLOBAL Y EN AMÉRICA LATINA: CULTIVOS VERSUS PRADERAS NATURALES

En 2022, la producción mundial de macroalgas alcanzó los 37,8 millones de toneladas, de las cuales 36,5 millones (97 %) fueron producidas mediante acuicultura (FAO, 2024a). De esta biomasa cultivada, *Saccharina japonica* representó un 30 %, destinada principalmente para consumo humano y, en menor medida, para extracción de alginato, mientras que las carragenófitas *Kappaphycus* y *Eucheuma* representaron un 27 % y la agarófita *Gracilaria* el 21 % (FAO, 2024b). Asia domina la producción de macroalgas

cultivadas, siendo China e Indonesia los principales productores, que abastecen un 56 % y un 27 % del volumen total, respectivamente. Los países fuera de Asia aportan en conjunto menos del 2 % (Banco Mundial, 2023).

Agar. Las principales empresas productoras de agar se encuentran en Chile, China e Indonesia. Estas dependen principalmente del cultivo de *Gracilaria* en China e Indonesia, y en menor medida en Chile (Porse y Rudolph, 2017). La especie *Gelidium* no se cultiva, por lo que su producción depende exclusivamente de poblaciones naturales, explotadas principalmente en Chile, China, España, Francia y Sudáfrica (Cai *et al.*, 2021).

Carragenano. La producción de carragenano se concentra en empresas establecidas en China y el Pacífico asiático (Porse y Rudolph, 2017). El cultivo de *K. alvarezii* (“cottonii”) y *E. denticulatum* (“spinosum”), principalmente en Indonesia y Filipinas, representa más del 80 % de la materia prima destinada a la extracción de carragenanos a nivel global (Cai *et al.*, 2021). Por el contrario, los géneros de aguas frías *Sarcopeltis* y *Sarcothalia* son extraídos de poblaciones naturales en América del Sur y *Chondrus* en Canadá y Francia (Valderrama *et al.*, 2013).

Alginato. China y Noruega son los principales productores de alginato. La materia prima proviene mayormente de poblaciones naturales de los géneros *Laminaria* (Francia, Noruega), *Lessonia* y *Macrocystis* (Chile, el Perú) y *Ascophyllum* (Francia, Islandia) (Porse y Rudolph, 2017). En la actualidad, *S. japonica* (ex *Laminaria japonica*) es la única especie de alginófito que se cultiva, principalmente en China.

Situación de la industria en América Latina

A diferencia de la tendencia global, la producción de macroalgas en América Latina depende en un 96 % de la explotación de poblaciones naturales, mientras que solo un 4 % proviene de cultivos (Espí Alemañ, Robledo y Hayashi, 2019). La Argentina, el Brasil, Chile, México y el Perú son los principales países que explotan recursos algales. Entre ellos, solo Chile aparece entre los principales productores de macroalgas por acuicultura, gracias al cultivo vegetativo de *Gracilaria chilensis* o “pelillo” (FAO, 2018). En el Cuadro 1 se presentan las principales especies productoras de ficocoloides de América Latina.

CUADRO 1
Especies de macroalgas provenientes de América Latina utilizadas para la industria de los ficocoloides

ALGAS ROJAS		
Especie	Ficocoloide	País
<i>Agardhiella tenera</i>	Carragenano	Perú
<i>Ahnfeltia plicata</i>	Agar	Chile
<i>Ahnfeltiopsis furcellata</i>	Carragenano	Chile
<i>Chondracanthus canaliculatus</i>	Carragenano	México
<i>Chondracanthus chamissoi</i>	Carragenano	Chile/Perú
<i>Chondrus canaliculatus</i>	Carragenano	Perú
<i>Gelidium chilense</i>	Agar	Chile
<i>Gelidium lingulatum</i>	Agar	Chile
<i>Gelidium rex</i>	Agar	Chile
<i>Gelidium robustum</i>	Agar	México
<i>Gracilaria caudata</i>	Agar	Brasil
<i>Gracilaria chilensis</i>	Agar	Chile

CUADRO 1 (CONTINUACIÓN)

ALGAS ROJAS		
Especie	Ficocoloide	País
<i>Gracilaria cornea</i>	Agar	Brasil
<i>Gracilariopsis howei</i>	Agar	Perú
<i>Gracilariopsis lemaneiformis</i>	Agar	México/Perú
<i>Graciariopsis tenuifrons</i>	Agar	Brasil
<i>Gymnogongrus furcellatus</i>	Caragenano	Perú
<i>Hypnea musciformis</i>	Carragenano	Brasil
<i>Kappaphycus alvarezii</i>	Carragenano	Brasil
<i>Mastocarpus papillatus</i>	Carragenano	Chile
<i>Mazzaella laminarioides</i>	Carragenano	Chile
<i>Mazzaella membranacea</i>	Carragenano	Chile
<i>Pterocladia capillacea</i>	Agar	Brasil
<i>Rhodoglossum denticulatum</i>	Carragenano	Perú
<i>Sarcopeltis skottsbergii</i> (ex <i>Gigartina skottsbergii</i>)	Carragenano	Chile
<i>Sarcothalia crispata</i>	Carragenano	Chile
ALGAS PARDAS		
Especie	Uso	País
<i>Eisenia arborea</i>	Alginato	México
<i>Lessonia nigrescens</i>	Alginato	Chile/Perú
<i>Lessonia trabeculata</i>	Alginato	Chile
<i>Macrocystis integrifolia</i>	Alginato	Chile/ Perú
<i>Macrocystis pyrifera</i>	Alginato	Chile/México/Perú
<i>Sargassum</i> spp.	Alginato	Brasil

Fuente: Modificado de White, W.L. y Wilson, P. 2015. World seaweed utilization. En: Tiwari, B.K. y Troy, D.J. (eds). Seaweed Sustainability. Food and Non-Food Applications, pp. 7–25. San Diego (Estados Unidos de América), Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-418697-2.00002-7>

LA INDUSTRIA DE FICOCOLOIDES EN LA ARGENTINA

La Argentina cuenta con alrededor de 4 500 km de costa, que abarcan las provincias de Buenos Aires, Río Negro, Chubut, Santa Cruz y Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur. Las costas patagónicas (Figura 1a) son diversas y presentan distintos tipos de fondos marinos, con abundantes sustratos con menor o mayor dureza (Figura 1b y Figura 1c). En estas costas se encuentran la mayoría de las especies de macroalgas marinas de interés económico del país. Las especies productoras de hidrocoloides con potencial para la industria incluyen las agarófitas *Gracilaria gracilis* y *Gelidium crinale*, las carragenófitas *S. skottsbergii*, *Sarcothalia crispata*, *Sarcothalia dichotoma*, *Iridaea cordata*, *Asterfilopsis furcellata* y *Gymnogongrus torulosus*, y las alginófitas *Macrocystis pyrifera* y *Lessonia flavicans* (Raffo, Dellatorre y Ciancia, 2022). Sin embargo, la explotación de algunas de estas especies a partir de la naturaleza no es viable actualmente, debido a su limitada distribución, escasa abundancia o a que solo se encuentran en zonas de difícil acceso (Piriz y Casas, 1996; Raffo, Dellatorre y Ciancia, 2022). Por esta razón, solo cuatro especies (*G. gracilis*, *S. skottsbergii*, *M. pyrifera* y *L. flavicans*) que han sido explotadas durante décadas, siguen siendo las especies con mayor potencial para la industria de los ficocoloides en el país (Figura 2).

Antecedentes

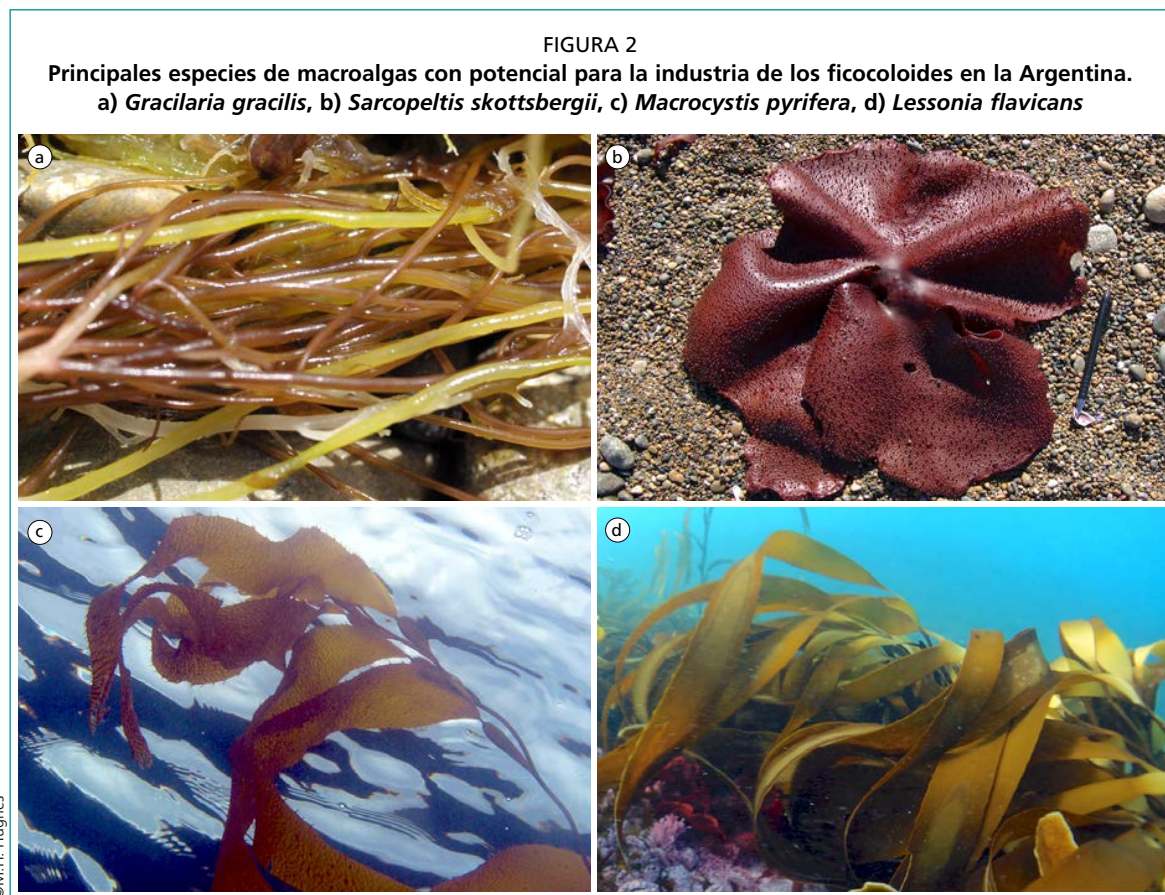
La explotación de macroalgas para la extracción de ficocoloides en la Argentina comenzó en la década de los 50, cuando la empresa privada Soriano S.A. inició la producción de agar a partir de *G. gracilis*. Esta especie era cosechada a partir de arribazones en Bahía Bustamante (Chubut) y caletas cercanas. Hacia 1980, la producción nacional satisfacía



la demanda interna, exportándose el excedente principalmente al Japón (Piriz y Casas, 1996). En la década de los años 70, la empresa expandió su producción para incluir harina de carragenófitas y carragenano, utilizando principalmente *S. skottsbergii* junto con pequeñas cantidades de *S. crispata*, recolectada y procesada junto a *S. skottsbergii*. Para completar el abastecimiento del mercado interno, también se importaba *Kappaphycus* desde Filipinas (Piriz y Casas, 1996; Boraso *et al.*, 2015). A partir del año 2000, se observó una marcada disminución en la biomasa cosechable de *G. gracilis*, afectando a la producción. Este declive coincidió con un incremento en la recolección del alga parda invasora *Undaria pinnatifida* (Raffo, Dellatorre y Ciancia, 2022). Tras el cierre de la empresa en 2018, la producción de ficocoloides en el país se detuvo por completo.

Recolección de materia prima y legislación

La recolección de la materia prima para la extracción de agar y carragenanos se ha realizado principalmente en la provincia de Chubut y, en menor medida, en Santa Cruz. Esta actividad se ha basado en la recolección de arribazones, ya sea por la empresa Soriano S.A. o por terceros que posteriormente vendían el material a dicha



empresa. Los gobiernos provinciales son los encargados de otorgar las concesiones para la explotación de macroalgas en la Argentina, permitiendo la recolección a partir de arribazones de *G. gracilis* y *S. skottsbergii*, así como la cosecha directa de *M. pyrifera* bajo condiciones específicas. Actualmente, la Cooperativa de Recolección, Acopio y Procesamiento de Productos del Mar (CRAPPMAR), en Camarones (Chubut) desde 2019, se dedica principalmente a la recolección de la especie invasora *U. pinnatifida*, junto con cantidades menores de *M. pyrifera* y *S. skottsbergii* (Robert y Raffo, 2021). Adicionalmente, el gobierno de la provincia de Santa Cruz ha firmado recientemente convenios con dos empresas para la explotación y cultivo de macroalgas en mar abierto.

Experiencias de cultivo de macroalgas productoras de ficocoloides en el país

Desde 1980 se ha destacado la posibilidad y la necesidad de desarrollar la acuicultura de macroalgas en la Argentina, principalmente de los géneros *Gracilaria*, *Sarcopeltis* y *Macrocystis* (Asensi, 1981). Sin embargo, desde ese momento hasta la actualidad, se han realizado escasas experiencias de cultivo de macroalgas tanto a escala de laboratorio como a escala piloto.

En el laboratorio, se han realizado experiencias de cultivo *in vitro* de *G. gracilis* proveniente de Bahía Bustamante, para investigar la liberación de carpósporas, su patrón de germinación y su asentamiento y crecimiento en diferentes sustratos. La liberación espontánea de esporas demostró ser el método más efectivo de inducción de la liberación (Michetti, Martin y Leonardi, 2013), con esporas que se asentaron y crecieron en los sustratos naturales evaluados (Hughes, Michetti y Leonardi, 2014). Por otro lado, Croce, Villar y Parodi (2015) estudiaron la propagación vegetativa en la agarófita *G. crinale* recolectada en Bahía Anegada (Buenos Aires), logrando que los fragmentos crecieran y generaran ramificaciones. Respecto a las carragenófitas de Cabo Raso (Chubut), se investigó tanto *S. skottsbergii* como *S. crispata*. Para *S. skottsbergii*, se encontró abundancia de carpósporas y tetrásporas durante invierno y primavera, aunque

con alta mortalidad en cultivos *in vitro* (Hughes, Michetti y Leonardi, 2020). Las esporas de *S. crispata* mostraron mejor desarrollo en sustratos naturales (piedras, conchillas) que en artificiales (sogas, vidrio) (Hughes, Michetti y Leonardi, 2019). En cuanto a las principales especies alginófitas, aún no se han desarrollado estudios de cultivo.

Se han realizado pocas experiencias de cultivo a escala piloto de *G. gracilis*. Boraso de Zaixso (1985) desarrolló cultivos suspendidos en el Golfo Nuevo (Chubut) para evaluar el crecimiento vegetativo a distintas profundidades y con diferentes métodos de sujeción. Casas y Piriz (1998) experimentaron con plantado directo y cuerdas de fondo en el mismo golfo, evaluando distintos tiempos de cosecha. La empresa Soriano S.A. realizó pruebas de cultivo en la década de 1990, adaptando técnicas chilenas mediante siembra directa en el fondo, uso de “chululos” y sistemas “long-line”. Sin embargo, estos cultivos fracasaron debido a las fuertes corrientes en la zona y el elevado nivel de epifitismo (Hayashi *et al.*, 2014). Actualmente, la Fundación Rewilding Argentina desarrolla experiencias de cultivo vegetativo de *G. gracilis* en Bahía Arredondo (Chubut), como parte de un proyecto iniciado en 2021 para restaurar las praderas de esta especie en la zona.

Desde la década de 1960 hasta la actualidad, se han realizado numerosos estudios fundamentales para el manejo adecuado del recurso y el desarrollo de cultivos de *G. gracilis* (Borasos de Zaixso, 1983; Martín, Borasos de Zaixso y Leonardi, 2011; entre otros), *S. skottsbergii* (Piriz, 1996; Piriz y Casas, 1996) y *M. pyrifera* (Kühnemann, 1963; Eyra y Borasos de Zaixso, 1994; entre otros). Asimismo, los hidrocoloides de macroalgas argentinas han sido objeto de extensa investigación. Se han analizado en detalle la composición química del agar de *G. gracilis* (Rodríguez *et al.*, 2009; entre otros), de los carragenanos de *S. skottsbergii* y *S. crispata* (Cerezo, 1967; Matulewicz *et al.*, 1989; Stortz, Casas y Cerezo, 1997; entre otros), y de alginatos de *M. pyrifera* (Gómez *et al.*, 2009; entre otros). Además, los estudios más recientes se han enfocado en las aplicaciones prácticas de los carragenanos de *S. skottsbergii* y *S. crispata* (Carlucci *et al.*, 1997; Hughes *et al.*, 2018; Hughes, Leonardi y Genovese, 2023).

CONCLUSIONES

El cultivo de macroalgas productoras de ficocoloides se concentra principalmente en Indonesia y Filipinas, donde se cultivan las carragenófitas *K. alvarezii* y *E. denticulatum* y, en menor medida en Chile, con la agarófitas *G. chilensis*. Esta última representa el único cultivo comercial en América Latina, mientras que las demás especies de la región se obtienen de praderas naturales. El desarrollo de cultivos representa una herramienta fundamental para prevenir la sobreexplotación de las praderas naturales y sostener el crecimiento de la industria. Sin embargo, este desarrollo conlleva numerosos desafíos, incluyendo las condiciones climáticas adversas, el epifitismo y las fluctuaciones del mercado.

Por otro lado, la mayoría de los países productores se limitan a cosechar y secar la biomasa para su exportación a otros países donde se procesa. La incorporación del valor agregado en origen a la materia prima cultivada aumentaría los precios de los productos y generaría empleo local, fortaleciendo las economías regionales. Una forma de agregar valor es mediante el desarrollo de biorrefinerías macroalgales, permitiendo un uso integral de la biomasa, agregando valor en cada etapa de la cadena y minimizando los residuos generados, contribuyendo así con la economía circular.

RECOMENDACIONES

La Argentina representa un caso singular: la industria de hidrocoloides, que fue próspera durante décadas, actualmente no produce ficocoloides. Esta situación se debe principalmente a la disminución en la disponibilidad del recurso y las dificultades para desarrollar cultivos. Para reactivar la industria en el país, es necesario investigar y desarrollar dos aspectos fundamentales: técnicas de cultivo adaptadas a las condiciones

regionales, incluyendo especies con potencial como *S. crispata*; y la implementación de políticas y planes de manejo efectivos.

REFERENCIAS

- Asensi, A. 1981. *Programas de investigación sobre el recurso de las algas marinas bentónicas en el litoral patagónico*. Informe técnico. Paris (Francia), UNESCO. <https://policycommons.net/artifacts/10705121/programas-de-investigacion-sobre-el-recurso-de-las-algas-marinas-benticas-en-el-litoral-patagonico/11612578/>
- Banco Mundial. 2023. *Global Seaweed. New and emerging markets report 2023*. Washington (Estados Unidos de América), Banco Mundial. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099081423104520569/pdf/P175786076444d0d8099f70563b5aa30b7c.pdf>
- Boraso de Zaixso, A.L. 1983. *Ecología de Gracilaria verrucosa (Hudson) Papenfus en poblaciones de la provincia de Chubut (Argentina)*. Buenos Aires (Argentina), Universidad Nacional de Buenos Aires. <https://www.repositorio.cenpat-conicet.gob.ar/handle/123456789/978>
- Boraso de Zaixso, A.L. 1985. Crecimiento de *Gracilaria verrucosa* en condición suspendida. *Memorias de la Sociedad Latinoamericana de Acuicultura*, 5(3): 415–418.
- Boraso de Zaixso, A.L., Ciancia, M., Cerezo, A.S., Piriz, M.L., Casas, G.N. y Eyra, M.C. 2015. *Utilización de las macroalgas marinas de la costa argentina y sus hidrocoloides*. En: H.E. Zaixso y A.L. Boraso (eds.) *La zona costera patagónica argentina*, Volumen I: Recursos biológicos bentónicos, págs. 3–60. Comodoro Rivadavia (Argentina), EDUPA. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/108199>
- Cai, J., Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Cornish, L., Dabbadie, L., Desrochers, A., Diffey, S., Garrido Gamarro, E., Geehan, J., Hurtado, A., Lucente, D., Mair, G., Miao, W., Potin, P., Przybyla, C., Reantaso, M., Roubach, R., Tauati, M. y Yuan, X. 2021. *Seaweeds and microalgae: an overview for unlocking their potential in global aquaculture development*. Circular de Pesca y Acuicultura de la FAO n.º 1229. Roma (Italia), FAO. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb5670en>
- Carlucci, M.J., Pujol, C.A., Ciancia, M., Nosedá, M.D., Matulewicz, M.C., Damonte, E.B. y Cerezo, A.S. 1997. Antiherpetic and anticoagulant properties of carrageenans from the red seaweed *Gigartina skottsbergii* and their cyclized derivatives: Correlation between structure and biological activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 20: 97–105. [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(96\)01145-2](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(96)01145-2)
- Casas, G. y Piriz, M.L. 1998. Cultivo experimental de la agarífera *Gracilaria gracilis* (Gracilariales, Rhodophyta) en Golfo Nuevo, Argentina. *Naturalia Patagónica*, 6: 51–69. [http://www.fcn.unp.edu.ar/sitio/naturalia/coleccion/Primera_Epoca/Ciencias_Biologicas/Naturalia%20Serie%20Ciencias%20Biol%20C3%B3gicas%20Vol%206%20\(1-2\)%201998.pdf#page=59](http://www.fcn.unp.edu.ar/sitio/naturalia/coleccion/Primera_Epoca/Ciencias_Biologicas/Naturalia%20Serie%20Ciencias%20Biol%20C3%B3gicas%20Vol%206%20(1-2)%201998.pdf#page=59)
- Cerezo, A.S. 1967. The carrageenan system of *Gigartina skottsbergii* S. et G. Part I. Studies on a fraction of κ -carrageenan. *Journal of Chemical Society C: Organic*, 992–997. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/1967/j3/j39670000992/unauth>
- Croce, M.E., Villar, M.A. y Parodi, E.R. 2015. Assessment of alternative sources of seaweed polysaccharides in Argentina: potentials of the agarophyte *Gelidium crinale* (Hare ex Turner) Gaillon (Rhodophyta, Gelidiales). *Journal of Applied Phycology*, 27: 2099–2110. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-015-0537-1>
- Espi Alemañ, A., Robledo, D. y Hayashi, L. 2019. Development of seaweed cultivation in Latin America: current trends and future prospects. *Phycologia*, 58(5): 462–471. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1640996>
- Eyra, M.C. y Boraso de Zaixso, A.L. 1994. Aspectos de la estrategia reproductiva de *Macrocystis pyrifera* (Phaeophyta, Laminariales) en poblaciones de la Costa Argentina. *Naturalia Patagónica*, 2: 33–47. [http://www.fcn.unp.edu.ar/sitio/naturalia/coleccion/Primera_Epoca/Ciencias_Biologicas/Naturalia%20Serie%20Ciencias%20Biol%20C3%B3gicas%20Vol%202%20\(1-2\)%201994.pdf#page=39](http://www.fcn.unp.edu.ar/sitio/naturalia/coleccion/Primera_Epoca/Ciencias_Biologicas/Naturalia%20Serie%20Ciencias%20Biol%20C3%B3gicas%20Vol%202%20(1-2)%201994.pdf#page=39)

- FAO. 2018. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2018. Cumplir los objetivos de desarrollo sostenible*. Roma (Italia), FAO. <http://www.fao.org/3/i9540es/I9540ES.pdf>
- FAO. 2024a. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024. La transformación azul en acción*. Roma (Italia), FAO. <https://openknowledge.fao.org/items/4fd469a1-224b-4775-8447-fdc5103c7d27>
- FAO. 2024b. *FishStat: Producción mundial de acuicultura 1950–2022*. En: *FishStatJ*. [Consultado el 29 de marzo de 2024]. www.fao.org/fishery/es/statistics/software/fishstatj
- Gomez, C.G., Lambrecht, M.V.P., Lozano, J.E., Rinaudo, M. y Villar, M.A. 2009. Influence of the extraction–purification conditions on final properties of alginates obtained from brown algae (*Macrocystis pyrifera*). *International Journal of Biological Macromolecules*, 44: 365–371. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2009.02.005>
- Hayashi, L., Bulboa, C., Kradolfer, P., Soriano, G. y Robledo, D. 2014. Cultivation of red seaweeds: a Latin American perspective. *Journal of Applied Phycology*, 26: 719–727. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-013-0143-z>
- Hughes, M.H., Michetti, K.M. y Leonardi, P.I. 2014. Settlement of *Gracilaria gracilis* carpospores (Gracilariales, Rhodophyta) on natural substrates from the southwestern Atlantic coast (Chubut, Argentina). *Botánica Marina*, 57(2): 131–137. <https://doi.org/10.1515/bot-2013-0084>
- Hughes, M.H., Michetti, K.M. y Leonardi, P.I. 2019. Spore release and germling development on different substrates in the carrageenophyte *Sarcothalia crispata* from the southwestern Atlantic coast. *Journal of Applied Phycology*, 31: 1285–1295. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-018-1643-7>
- Hughes, M.H., Michetti, K.M. y Leonardi, P.I. 2020. Reproductive potential and early spore settlement on different substrates in *Gigartina skottsbergii* (Gigartinaceae, Rhodophyta) from the South American Atlantic coast. *Journal of Applied Phycology*, 32: 3495–3507. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-020-02161-w>
- Hughes, M.H., Leonardi, P.I. y Genovese, D.B. 2023. Native hybrid carrageenans from *Sarcopeltis skottsbergii* and *Sarcothalia crispata*: The role of counterions on their gelling properties. *Algal Research*, 73: 103159. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-020-02161-w>
- Hughes, M.H., Prado, H.J., Rodríguez, M.C., Michetti, K., Leonardi, P.I. y Matulewicz, M.C. 2018. Carrageenans from *Sarcothalia crispata* and *Gigartina skottsbergii*: Structural Analysis and Interpolyelectrolyte Complex Formation for Drug Controlled Release. *Marine Biotechnology*, 20(6): 706–717. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10126-018-9842-4>
- Kühnemann, O. 1963. Penetración de *Macrocystis pyrifera* en la Ría de Puerto Deseado. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 10(2-3): 105–112.
- Martin, L.A., Boraso de Zaixso, A.L. y Leonardi, P.I. 2011. Biomass variation and reproductive phenology of *Gracilaria gracilis* in a Patagonian natural bed (Chubut, Argentina). *Journal of Applied Phycology*, 23(4): 643–654. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-010-9555-1>
- Matulewicz, M.C., Ciancia, M., Nosedá, M.D. y Cerezo, A.S. 1989. Carrageenan systems from tetrasporic and cystocarpic stages of *Gigartina skottsbergii*. *Phytochemistry*, 28(11): 2937–2941. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(89\)80257-2](https://doi.org/10.1016/0031-9422(89)80257-2)
- Michetti, K.M., Martín, L.A. y Leonardi, P.I. 2013. Carpospore release and sporeling development in *Gracilaria gracilis* (Gracilariales, Rhodophyta) from the southwestern Atlantic coast (Chubut, Argentina). *Journal of Applied Phycology*, 25: 1917–1924. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-013-0029-0>
- Piriz, M.L. 1996. Phenology of a *Gigartina skottsbergii* Setchell et Gardner population in Chubut province (Argentina). *Botánica Marina*, 39(1–6): 311–316. <https://doi.org/10.1515/botm.1996.39.1-6.311>

- Piriz, M.L. y Casas, G. 1996. *Macroalgas de interés comercial en las costas del sur de Chubut y norte de Santa Cruz*. Informe Técnico 26, Plan de Manejo Integrado de la Zona Costera Patagónica. GEF/PNUD, FPN/WCS. https://patagonianatural.org.ar/wp-content/uploads/2021/04/265_IT26.pdf
- Porse, H. y Rudolph, B. 2017. The seaweed hydrocolloid industry: 2016 updates, requirements, and outlook. *Journal of Applied Phycology*, 29: 2187–2200. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-017-1144-0>
- Raffo, M.P., Dellatorre, F. y Ciancia, M. 2022. Seaweed resources of Argentina (SW Atlantic): production, bio-ecological, applied research and challenges for sustainable development. *Applied Phycology*, 3(1): 383–421. <https://doi.org/10.1080/26388081.2022.2076260>
- Robert, M. y Raffo, M.P. 2021. La actividad alguera de Camarones (Chubut, Argentina): estado actual y estacionalidad de los recursos. XXXVIII Jornadas Argentinas de Botánica, Oro Verde (Argentina), 6–8 de septiembre de 2021.
- Rodríguez, M.C., Matulewicz, M.C., Noseda, M.D., Ducatti, D.R.B. y Leonardi, P.I. 2009. Agar from *Gracilaria gracilis* (Gracilariales, Rhodophyta) of the Patagonic coast of Argentina – Content, structure and physical properties. *Bioresource Technology*, 100(3): 1435–1441. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.08.025>
- Stortz, C.A., Cases, M.R. y Cerezo, A.S. 1997. The system of agaroids and carrageenans from the soluble fraction of the tetrasporic stage of the red seaweed *Iridaea undulosa*. *Carbohydrate Polymers*, 34(1–2): 61–65. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(97\)00097-0](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(97)00097-0)
- Valderrama, D., Cai, J., Hishamunda, N. y Ridler, N. 2013. *Social and economic dimensions of carrageenan seaweed farming*. Documento Técnico de Pesca y Acuicultura de la FAO n.º 580. Roma (Italia), FAO. <http://hdl.handle.net/1969.1/1581938>

Gobernanza en el cultivo de macroalgas comerciales en Chile

Marisol Alvarez Sotomayor

Subsecretaría de Pesca y Acuicultura

Valparaíso, Chile

Álvarez Sotomayor, M. 2025. *Gobernanza en el cultivo de macroalgas comerciales en Chile*. En: Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Murúa Andrade, P. y Farías Molina, A. (coords.). Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 24-26 de junio de 2024, Puerto Varas, Chile. *FAO Actas de Pesca y Acuicultura*. N.º 74. Roma, FAO. pp. 167-173.

RESUMEN

La acuicultura chilena es una actividad económica relevante por sus amplias escalas de producción, generación de ingresos y creación de empleo. Chile es reconocido mundialmente como uno de los principales productores de acuicultura, ocupando el segundo lugar en la producción de salmones y mejillones. En cuanto al cultivo de macroalgas, en 2023 alcanzó una producción de 14 200 toneladas cosechadas, con exportaciones de 2 168 toneladas por un valor de 31 millones de USD, principalmente derivados de la producción de pelillo. Este trabajo aborda las materias de gobernanza para el cultivo de macroalgas comerciales en Chile, así como propuestas de modificaciones y ajustes para mejorar su desempeño. En materia de gobernanza, Chile cuenta con políticas sectoriales, instituciones públicas normativas, fiscalizadoras y de fomento, así como instancias de participación público-privadas y un amplio marco normativo. Estos elementos brindan certeza para la inversión y desarrollo del sector cultivador de macroalgas. El marco institucional y normativo chileno, aunque es robusto, requiere modificaciones legales para formalizar la acuicultura en pequeña escala y el extensionismo, fortalecer la investigación y diversificación, y reconocer los desafíos globales, como el cambio climático, entre otros. Para lograr estos objetivos, es importante establecer colaboraciones en América Latina y el Caribe que apoyen el desarrollo sostenible del cultivo comercial de macroalgas.

ESTADO DEL ARTE DE LA GOBERNANZA

La acuicultura en Chile ha experimentado un notable crecimiento y desarrollo en las últimas décadas. Se ha posicionado como una actividad económica de gran escala en producción, ingresos y empleo; representando el mayor porcentaje de las exportaciones sectoriales. Durante 2023, generó retornos de 7 120 millones de USD correspondientes a un volumen exportado de 929 000 toneladas a 92 destinos alrededor del mundo, principalmente los Estados Unidos de América, el Japón, el Brasil, la Federación de Rusia, China y México.

En 2023, este sector cultivó 27 especies a nivel comercial, con una cosecha total de 1,49 millones de toneladas, principalmente de salmónidos y mejillones (SUBPESCA, 2024). Actualmente operan 3 246 centros de cultivo autorizados en concesiones de acuicultura en zonas costeras, abarcando 31 520 hectáreas (SUBPESCA, 2024), a las que se suman 344 criaderos (*hatcheries*) y pisciculturas (SERNAPESCA, 2023). Las

instalaciones se concentran principalmente en la zona sur austral del país. Estas cifras han posicionado a Chile como uno de los principales productores de acuicultura, ocupando el segundo lugar en la producción de salmones y mejillones.

En ese contexto, la acuicultura de macroalgas a nivel nacional se ha realizado principalmente con la producción de *Gracilaria chilensis* (*Agarophyton chilense*), comúnmente llamada “pelillo” o “lamilla”, un alga roja de distribución cosmopolita que habita naturalmente en bahías protegidas con fondos arenosos. Este cultivo surgió tras el colapso de las praderas naturales en la década de los 80. En los últimos años, se han realizado esfuerzos para diversificar las especies de macroalgas, llegando actualmente a cuatro especies a nivel de cultivo comercial: pelillo, huiro (*Macrocystis pyrifera*), luga negra (*Sarcothalia crispata*) y luga roja (*Sarcopeltis skottsbergii*), además de otras en fase experimental o de escalamiento productivo. A pesar de que existen más de 600 centros de cultivo autorizados, en 2023 las cosechas de macroalgas cultivadas alcanzaron solo 14 200 toneladas, con exportaciones de 2 168 toneladas por un valor de 31 millones de USD (SUBPESCA, 2024). Estas cifras contrastan significativamente con la producción de praderas naturales, que en 2022 alcanzó 464 024 toneladas de desembarque en todo el país. Esta situación difiere notablemente de la tendencia mundial, donde el cultivo de algas representa un 29 % del total de las cosechas mundiales y el 97 % de las algas comercializadas provienen de cultivo (FAO, 2022).

Chile reconoce la importancia del cultivo comercial de macroalgas debido a sus múltiples usos: alimento (humano y de otras especies), producción de ficocoloides (industria cosmética, farmacéutica y alimentaria), producción de biocombustibles, acuicultura multitrófica, biorremediación, captura de carbono, entre otros (Buschmann *et al.*, 2013).

Si bien el desarrollo de la industria del cultivo de macroalgas en Chile no alcanza el nivel de otras industrias nacionales como la salmonicultura y el cultivo de mejillones, el país cuenta con condiciones favorables para potenciar estos cultivos. Esto se evidencia al analizar las principales barreras que, según la FAO, enfrentan los sistemas de producción acuícolas: la gobernanza, la inversión, las innovaciones y el desarrollo de capacidades y competencias, incluyendo habilidades técnicas, digitalización, información científica y formación técnica y profesional (FAO, 2022). Este documento se centra en las materias de gobernanza para el cultivo de macroalgas comerciales en Chile.

En materia de gobernanza para el cultivo de macroalgas, Chile dispone de un sólido marco institucional que incluye organismos normativos, fiscalizadores y de fomento. Este marco proporciona certeza jurídica para la inversión y el desarrollo del sector cultivador, respaldado por la legislación establecida y políticas sectoriales específicas.

En el ámbito de las políticas públicas, Chile cuenta desde 2003 con la Política Nacional de Acuicultura, cuyo objetivo principal es “promover el máximo nivel posible de crecimiento económico de la acuicultura chilena en el tiempo, en un marco de sostenibilidad ambiental y equidad en el acceso a la actividad” (SUBPESCA, 2003). Este marco se complementa con la *Política nacional de uso del borde costero* (SSFFAA, 1995) y la *Política oceánica nacional* (MINREL, 2018). Asimismo, destaca la *Ley marco de cambio climático* (Ley N.º 21.455, 2022), que establece la elaboración de planes de acción sectoriales. Disponible en la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1177286>. Para el sector pesquero acuícola, este plan existe desde 2015 y actualmente se encuentra en proceso de actualización (SUBPESCA, 2015).

A nivel institucional, en Chile la actividad acuícola se concentra principalmente en el Ministerio de Economía, Fomento y Turismo (MINECON), cuya misión es impulsar el modelo de desarrollo productivo en el país (Figura 1). Este Ministerio cuenta con las siguientes instituciones:

- Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (SUBPESCA): institución encargada de regular y administrar la actividad pesquera y la acuicultura a través de políticas, normas y medidas administrativas, aplicando un principio precautorio con enfoque ecosistémico, basado en la información científica disponible.
- Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (SERNAPESCA): institución encargada de contribuir a la sustentabilidad del sector, a través de una fiscalización integral y gestión sanitaria, que influye en el comportamiento sectorial promoviendo el cumplimiento de las normas.
- Instituto Nacional de Desarrollo Sustentable de la Pesca Artesanal y de la Acuicultura de Pequeña Escala (INDESPA): institución que apoya a pescadores y pescadoras artesanales, buzos, recolectores y recolectoras de orilla, acuicultores y acuicultoras de pequeña escala y sus respectivas organizaciones, facilitando su acceso a iniciativas que aumenten su capacidad productiva y comercial mediante la agregación de valor y diversificación productiva.
- Instituto de Fomento Pesquero (IFOP): institución dedicada a generar, desarrollar y transferir conocimiento útil, que permita posicionar a Chile y su industria nacional de manera competitiva y sostenible en el sector de la acuicultura y la pesca, especialmente por sus investigaciones de alto valor público. IFOP ejecuta el programa de investigación básica, financiado por SUBPESCA, que incluye iniciativas de seguimiento ambiental, oceanográfico, sanitario, plagas y de acuicultura de pequeña escala.
- Corporación de Fomento de la Producción (CORFO): institución que fomenta la inversión, la innovación y el emprendimiento, fortaleciendo el capital humano y el desarrollo tecnológico para mejorar la productividad del país y alcanzar posiciones de liderazgo mundial en materia de competitividad.

También es importante mencionar la labor de la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas (SSFFAA), entidad que administra el borde costero litoral y lacustre de Chile a través del otorgamiento de Concesiones Marítimas y de Acuicultura, la zonificación y la formulación de políticas en los espacios de competencia del Ministerio de Defensa Nacional.

A su vez, el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) busca establecer un nuevo modelo de desarrollo enfocado en la protección del medioambiente y el bienestar de las personas. Este objetivo se persigue mediante la implementación de procesos de Transición Socio Ecológica Justa y la integración de un enfoque ecológico transversal en la gestión y el ciclo de políticas públicas del Estado. En este Ministerio encontramos:

- Servicio de Evaluación Ambiental (SEA): administra el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) y coordina a los organismos estatales involucrados, ejerciendo la rectoría técnica exclusiva y excluyente en la evaluación de impacto ambiental. También promueve y facilita la participación ciudadana en la evaluación de proyectos.
- Superintendencia del Medio Ambiente (SMA): ejecuta, organiza y coordina el seguimiento y fiscalización de las Resoluciones de Calificación Ambiental, de las medidas de los Planes de Prevención y/o de Descontaminación Ambiental, del contenido de las Normas de Calidad Ambiental y Normas de Emisión, y de los Planes de Manejo, cuando corresponda, y de todos aquellos otros instrumentos de carácter ambiental que establezca la ley.
- Tribunales Ambientales: órganos jurisdiccionales especiales independientes, cuya función es resolver las controversias medioambientales de su competencia y otros asuntos que la ley les asigne.

El marco legal del sector acuicultor de macroalgas en Chile se fundamenta principalmente en lo establecido en la *Ley general de pesca y acuicultura* (Ley

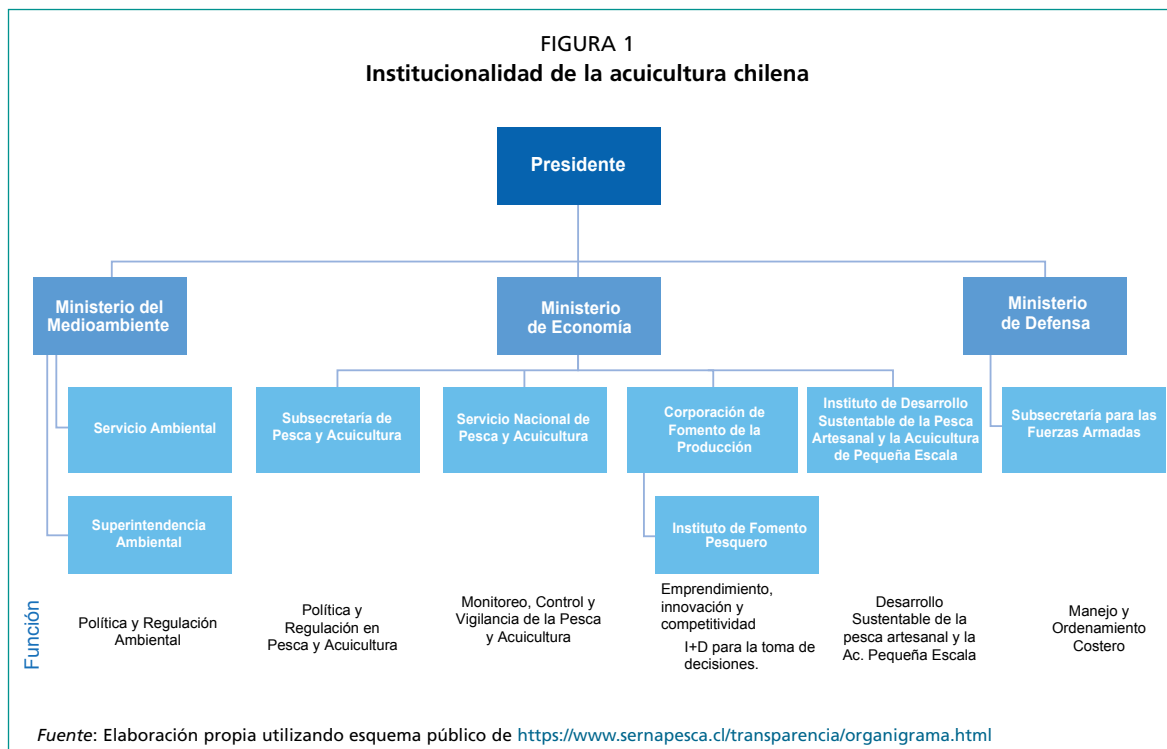
N.º 18.892, 1989), disponible en la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=13315>). Esta ley regula los procedimientos para el otorgamiento de permisos sectoriales, el ordenamiento territorial, los requisitos ambientales, el control de plagas, la operación y caducidad de los centros de cultivo, así como de la investigación para la administración, Comisión Nacional de Acuicultura y los Comités Científico Técnico de Acuicultura, entre otros aspectos.

De acuerdo con la normativa nacional, los cultivos de macroalgas pueden realizarse en múltiples espacios: concesiones de acuicultura, acuicultura en Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB), acuicultura en Espacios Costero Marinos para Pueblos Originarios (ECMPO), caletas de la pesca artesanal y terrenos privados.

La Ley General de Pesca y Acuicultura (LGPA) establece 16 reglamentos específicos para el cultivo de macroalgas en Chile. Estos regulan aspectos como el otorgamiento de permisos, registro, entrega de información estadística, acreditación de origen, manejo de plagas, requisitos ambientales, acuicultura de pequeña escala, operación mínima, limitación de áreas, importación de especies y acuicultura en AMERB.

Además, se aplica la *Ley sobre bases generales del medio ambiente* (Ley N.º 19.300, 1994). Según esta ley, los proyectos de cultivo comercial de macroalgas deben cumplir con una evaluación ambiental en el marco del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental en dos casos: primero, cuando la producción anual sea igual o mayor a quinientas toneladas (500 t) o la superficie de cultivo sea igual o superior a 100 000 m²; segundo, cuando el cultivo, independientemente de su producción anual, requiera suministro o evacuación de aguas de origen continental, marina o estuarina.

Por otra parte, cabe destacar la Ley N.º 20.925 (2016), que creó una bonificación para el repoblamiento y cultivo de algas. Esta Ley busca incrementar la biomasa disponible de recursos algales de importancia ecológica y económica existentes en el territorio nacional mediante el establecimiento de un sistema de bonificación para las y los pescadores artesanales, organizaciones de pescadores artesanales y demás micro y pequeñas empresas que participan en la recuperación de la cobertura algal en las zonas de intervención.



A nivel nacional existen dos instancias importantes de participación público-privada:

- La Comisión Nacional de Acuicultura (CNA), reconocida en la LGPA, está conformada por siete instituciones públicas, siete representantes de asociaciones de acuicultores (uno del sector de las macroalgas), tres representantes de prestadores de servicios de la acuicultura y dos representantes de trabajadores de centros de cultivo. La Comisión ejecuta e implementa la Política Nacional de Acuicultura, evalúa propuestas reglamentarias y legales sectoriales, y emite opiniones sobre la zonificación del borde costero, asuntos internacionales relevantes y programa de investigación, entre otras funciones.
- La Mesa Nacional de Acuicultura de Pequeña Escala, instancia creada por el actual Subsecretario de Pesca y Acuicultura, promueve el trabajo colaborativo para compartir y relevar iniciativas para la Acuicultura de Pequeña Escala (APE). La integran representantes de SUBPESCA, SERNAPESCA, INDESPA, IFOP y acuicultores de pequeña escala que representan la diversidad de la actividad que se realiza a lo largo de Chile. Estos últimos cultivan diferentes especies (algas, moluscos y peces), utilizando distintas tecnologías y formas de asociación en concesiones de acuicultura, terrenos privados y AMERB.

Adicionalmente, existen tres Comités Científico Técnico de Acuicultura (CCTA): ambiental, sanitario y de ordenamiento territorial. Estos comités son organismos asesores y de consulta de la Subsecretaría en las materias científicas relevantes para la administración de la actividad acuícola nacional, incluyendo los aspectos del cultivo de algas. Cada CCTA está integrado por cinco profesionales nombrados mediante concurso público por un plazo de cuatro años, bajo criterios de paridad de género. Estos profesionales deben tener especialidad en ciencias del mar, medicina, veterinaria u otras carreras científicas con especialización en materias ambientales o recursos naturales. Además, en los CCTA participan representantes de SUBPESCA e IFOP.

Si bien Chile cuenta con un marco institucional y normativo robusto, este resulta difícil de entender y aplicar para los productores de la acuicultura de pequeña escala, quienes son los principales productores de algas en Chile. En la actualidad, la normativa diferencia algunos de los requisitos que deben cumplir los cultivos de macroalgas respecto de otros tipos de cultivos (como por ejemplo el cultivo intensivo de peces) en relación con las exigencias de distancia, evaluación y seguimiento ambiental y en algunos casos incluso les exime del pago de patente. Sin embargo, muchos de los requisitos de otorgamiento y operación siguen siendo difíciles de cumplir para quienes desarrollan esta actividad. Por ello, Chile está trabajando en la elaboración de un nuevo cuerpo legal exclusivo para la acuicultura. En este resulta relevante incorporar el concepto APE y reducir las barreras de acceso y mantención en la actividad, relacionadas con brechas ambientales, tecnológicas, organizacionales y económicas, entre otras. Adicionalmente, esta nueva ley debe considerar ámbitos que hoy constituyen desafíos globales, como el enfoque ecosistémico, el cambio climático, una salud, la seguridad, la inocuidad y la soberanía alimentaria, así como el uso sustentable de recursos genéticos, entre otros (FAO, 2018; Aguilar-Manjarrez, Soto y Brummett, 2018; FAO, 2019; FAO, 2023).

En otras materias, es necesario avanzar significativamente en la implementación de extensionismo para los centros APE, que apoyen a los acuicultores en terreno en aspectos tecnológicos, de información, gestión y comercialización, entre otros. Este modelo, que ya existe en Chile para el sector agropecuario, ha demostrado ser un aporte relevante, tal como se observa también en otros países de América Latina y el Caribe en el ámbito de la acuicultura.

Reconociendo los múltiples beneficios económicos y ecosistémicos del cultivo de macroalgas, es necesario incorporar incentivos que permitan incrementar los volúmenes de cultivo y desarrollar policultivos, ello acompañado del desarrollo y fortalecimiento de mercados y nuevos productos.

Los desafíos en los cultivos de algas aumentan con el tiempo, especialmente en lo que respecta a las plagas. En Chile, desde hace algún tiempo los cultivos de alga pelillo se han visto afectados por algas verdes epifitas que dificultan el cultivo y producen una importante pérdida de biomasa productiva. En este ámbito, como en otros, los desafíos van más allá de lo normativo, abarcando aspectos de fiscalización, investigación y gestión. Por ello, es fundamental, la coordinación entre las instituciones públicas, los gobiernos regionales y locales, las instituciones de investigación y los propios acuicultores.

La diversificación de especies es también un desafío que requiere no solo el desarrollo de tecnologías, también es necesario la agilización de permisos sectoriales y el desarrollo de productos y mercados. En esta línea destaca el Programa Tecnológico de CORFO Huiro Regenerativo, cuyo objetivo es conformar e implementar una unidad de apoyo que permita cerrar las brechas existentes y consolidar la tecnología de cultivo regenerativos de *M. pyrifera* a través de la aplicación de herramientas e innovaciones biotecnológicas, sustentando así el desarrollo integral y escalamiento del cultivo. Instancias como estas deben replicarse para otras especies que muestren potencial de desarrollo en Chile.

Si bien Chile ha desarrollado investigación asociada al cultivo de macroalgas, los sistemas se han vuelto más complejos con el paso del tiempo, lo que determina la necesidad de generar nuevas líneas de investigación. Estas deben enfocarse, por ejemplo, en el manejo de plagas que afectan a los cultivos, como es el caso de *Rhizoclonium*. Es necesario fortalecer las líneas de financiamiento de proyectos y programas, tanto para el desarrollo de nuevos cultivos, como para el estudio de sus condiciones ambientales, sociales y el control de plagas.

Para todas las materias mencionadas anteriormente, resulta fundamental generar instancias colaboración entre los países de América Latina y el Caribe, con el fin de apoyar el desarrollo conjunto del cultivo comercial de macroalgas bajo el objetivo de la sostenibilidad.

REFERENCIAS

- Aguilar-Manjarrez, J., Soto, D. y Brummett, R. 2018. *Zonificación acuícola, selección de sitios y áreas de manejo bajo el enfoque ecosistémico a la acuicultura. Un manual. Informe ACS18071*. Roma, FAO y el Grupo del Banco Mundial, Washington DC. 62 p. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/1a1d23f7-28cc-49f6-8c5f-8da2453202c7/content>
- Buschmann, A., Stead, R., Hernández-González, M.C., Pereda, S., Paredes, J. y Maldonado, A. 2013. *Un análisis crítico sobre el uso de macroalgas como base para una acuicultura sustentable*. Revista Chilena de Historia Natural 86: 251–264. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2013000300003>
- FAO. 2018. *Impactos del cambio climático en la pesca y la acuicultura: Síntesis de los conocimientos y las opciones de adaptación y mitigación actuales. Resumen del Documento Técnico de Pesca y Acuicultura de la FAO n.º 627*. Roma. 48 p. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/8ac3ce89-8b65-4863-aadb-ec36d430f8e3/content>
- FAO. 2019. *The State of the World's Aquatic Genetic Resources for Food and Agriculture 2019*. FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture assessments. Roma. <https://www.fao.org/3/CA5256EN/CA5256EN.pdf>
- FAO. 2022. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022. Hacia la transformación azul*. Roma, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0461es>
- FAO. 2023. *Informe de la 12.ª reunión del subcomité de Acuicultura, Hermosillo, México, 16–19 de mayo de 2023*. Informe de Pesca y Acuicultura n.º 1414. Roma. <https://www.fao.org/3/cc7093t/cc7093t.pdf>
- Gobierno de Chile. 1989. *Ley General de Pesca y Acuicultura* (Ley N.º 18.892). En *Decreto 430 de 1991*, que fija el texto refundido, coordinado y sistematizado de esta ley. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=13315>.

- Gobierno de Chile.** 1994. *Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente* (Ley N.º 19.300). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>.
- Gobierno de Chile.** 2016. *Crea Bonificación para el Repoblamiento y Cultivo de Algas* (Ley N.º 20.925). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1091690>.
- Gobierno de Chile.** 2022. *Ley Marco de Cambio Climático* (Ley N.º 21.455). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1177286>.
- MINREL (Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile).** 2018. *Política Oceánica Nacional*. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1118403>
- SERNAPESCA (Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura de Chile).** 2023. *Anuario Estadístico de Pesca y Acuicultura 2022*. <https://www.sernapesca.cl/informacion-utilidad/anuarios-estadisticos-de-pesca-y-acuicultura/>
- SUBPESCA (Subsecretaría de Pesca y Acuicultura de Chile).** 2003. *Política Nacional de Acuicultura*. <https://www.subpesca.cl/portal/616/w3-article-60019.html>
- SUBPESCA.** 2015. *Plan de Adaptación al Cambio Climático para Pesca y Acuicultura*. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2016/12/Plan-Pesca-y-Acuicultura-CMS.pdf>
- SUBPESCA.** 2024. *Informe Sectorial de Pesca y Acuicultura Consolidado (2022–2023)*. https://www.subpesca.cl/portal/618/articulos-121323_documento.pdf
- SSFFAA (Subsecretaría para las Fuerzas Armadas de Chile).** 1995. *Política Nacional de Uso del Borde Costero*. https://www.ssffaa.cl/indexb6c8.html?page_id=2363

Viabilidad legal para la diversificación y el escalamiento de cultivos de macroalgas en América Latina: el caso de *Kappaphycus*

Miguel Sepúlveda

*Consultor en Algas Marinas
Rio de Janeiro, Brasil*

Sepúlveda, M. 2025. *Viabilidad legal para la diversificación y el escalamiento de cultivos de macroalgas de América Latina: el caso de Kappaphycus*. En: Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Murúa Andrade, P. y Farías Molina, A. (coords.). Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 24-26 de junio de 2024, Puerto Varas, Chile. *FAO Actas de Pesca y Acuicultura*. N.º 74. Roma, FAO. pp. 175-183.

RESUMEN

En las últimas décadas, el cultivo comercial de *Kappaphycus* en América Latina ha aumentado significativamente. Este incremento responde a dos factores: la búsqueda de medios de subsistencia por parte de las comunidades costeras y la expansión de las industrias de carragenina, cuya demanda mundial crece un 5 % anual. Sin embargo, los gobiernos locales han expresado preocupación por el impacto ambiental que los cultivos de *Kappaphycus* puedan tener en el ecosistema y proponen implementar procedimientos de monitoreo ambiental. Para establecer un cultivo comercial de esta especie, se requieren varios elementos clave: investigaciones que indiquen que la ubicación es apropiada; un programa de desarrollo del cultivo bien diseñado y financiado, con un plan de manejo sólido; un mercado garantizado y el compromiso de mantener los cultivos a largo plazo. Actualmente, varios países de América Latina desarrollan proyectos sostenibles con inversión privada para la producción de *Kappaphycus*, en colaboración con las comunidades costeras, reemplazando actividades extractivas. Respecto a la viabilidad legal del cultivo de *Kappaphycus* en América Latina, es fundamental que los países establezcan marcos normativos para la producción comercial de esta especie, el desarrollo socioeconómico y la protección del medio ambiente marino.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la industria productora de ficocoloides para consumo humano y otros usos ha incrementado la explotación de las macroalgas que se encuentran en estado natural y su cultivo a gran escala (Berger, 2020; FAO, 2020). Entre las especies cultivadas con mayor éxito en el mundo se encuentran los géneros *Euclidean* y *Kappaphycus* (Gigartinales, Rhodophyta). Estas macroalgas de distribución tropical, con doce especies conocidas a nivel mundial, destacan por la facilidad de su cultivo y son fuentes de materia prima para usos alimentarios, farmacéuticos, cosmetológicos y agrícolas (Neish *et al.*, 2017). Sin embargo, *Kappaphycus* no es un alga endémica ni nativa de América Latina, aunque ha sido introducida en países como Belice, el Brasil, Colombia, Cuba, el Ecuador, México, Panamá, y la República Bolivariana de

Venezuela. Estos países cuentan con características ambientales adecuadas para su cultivo, lo permiten obtener abundantes cosechas en poco tiempo a partir de siembras iniciales de baja biomasa.

VIABILIDAD LEGAL PARA EVALUAR PROYECTOS DE CULTIVOS CON *KAPPAPHYCUS*

Antes de emprender proyectos de cultivo con *Kappaphycus*, es necesario analizar los reglamentos, normativas y marcos legales vigentes del país interesado mediante consultas a las entidades de regulación ambiental. Esto permitirá determinar las normas vigentes y restricciones aplicables. En general, el proceso requiere un estudio de impacto ambiental que incluya una descripción de las características físicas y socioeconómicas de la zona o sector donde se desarrollará el cultivo; una descripción detallada del proyecto; los posibles impactos ambientales y sus medidas de mitigación. Adicionalmente, se debe presentar un plan de manejo ambiental que establezca las acciones de seguimiento, monitoreo y de contingencia. Una vez cumplidos estos requisitos, la entidad ambiental otorga al beneficiario la licencia ambiental de instalación y operación para la ejecución del proyecto, sujeta al cumplimiento de algunos requisitos que la misma establezca.

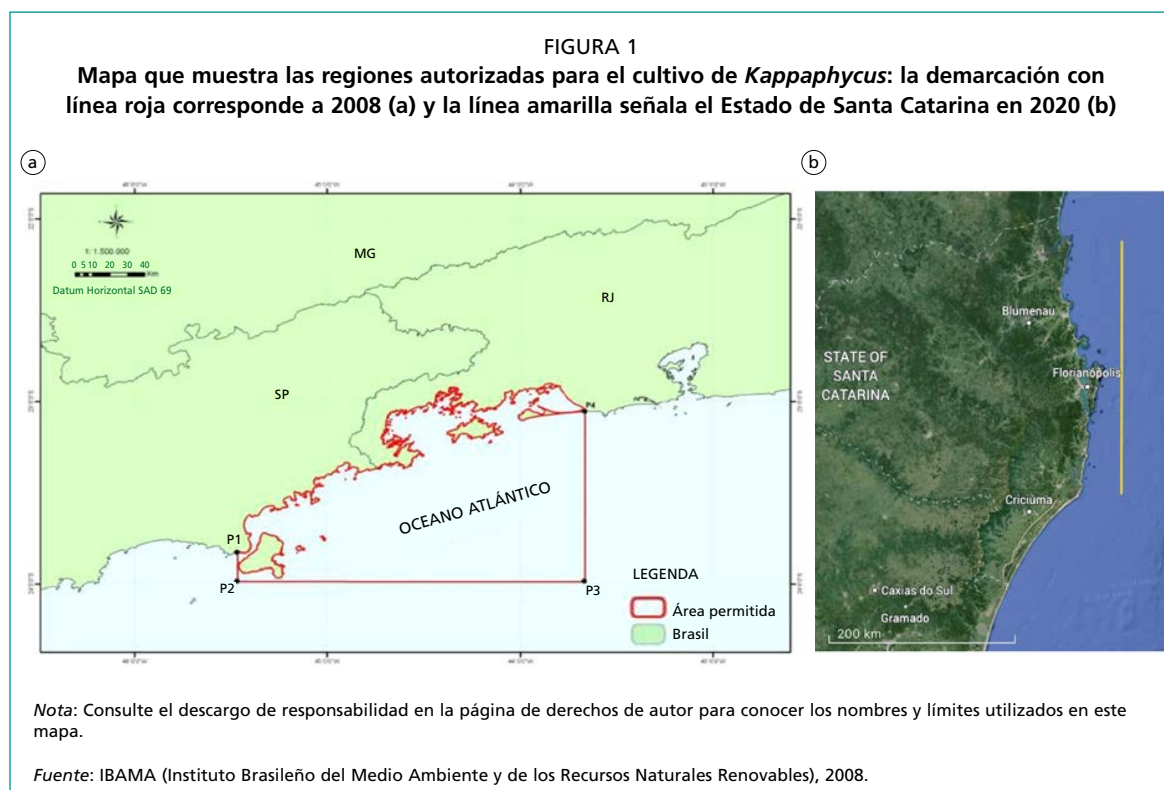
ASPECTOS LEGALES DE LOS CULTIVOS DE *KAPPAPHYCUS* EN AMÉRICA LATINA

El Brasil

En el Brasil, en 1995, Edison de Paula (Paula y Pereira, 1998) introdujo un clon con 0,5 g de *Kappaphycus alvarezii* proveniente del Japón para cultivo *in vitro* en laboratorio, que posteriormente fue traslado hasta el mar de la Playa do Itaguá (Ubatuba, São Paulo) para cultivo experimental. En 1998, la empresa Seaweed Consulting (www.seaweedconsulting.com) introdujo en Río de Janeiro (Isla Grande) un total de 20 kg de otro clon de *K. alvarezii*. Este fue traído desde las Islas Coche, de la República Bolivariana de Venezuela, por el biólogo marino Miguel Sepúlveda, quién lo obtuvo de Raúl Rincones de la empresa BIOTECMAR C.A., con el Certificado Fitosanitario del gobierno venezolano para estudios de ecología, cultivo experimental y piloto (Sepúlveda, 2021). A su llegada a Brasil, las macroalgas fueron puestas en cuarentena en el Laboratorio de Camarones Marinos de la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC), donde fueron cultivadas *in vitro* por el profesor Roberto Derner, del laboratorio de algas. Posteriormente las macroalgas fueron trasladadas hacia la Isla Grande en el sur de Río de Janeiro para cultivo experimental. En el año de 2001, la empresa Seaweed Consulting logró implementar el primer cultivo comercial de *Kappaphycus* en la región de la Bahía de Isla Grande, en Río de Janeiro, con la aprobación del Instituto Brasileño de Medio Ambiente (IBAMA) (Sepúlveda, 2021).

Luego, a través de un estudio de monitoreo ambiental realizado por el Instituto de Investigaciones del Jardín Botánico de Río de Janeiro, y la Universidad del Estado de Río de Janeiro (UERJ), la especie *Kappaphycus* fue considerada inofensiva para el medio ambiente, lo que permitió su cultivo comercial bajo la Ley de Instrucción Normativa de 2008 (IBAMA, 2008). Esta ley autorizó su cultivo entre la región costera de la Baía de Sepetiba en Río de Janeiro hasta la Isla Bela, en São Paulo (Castelar, Reis y Bastos, 2009). Más recientemente, la ley de Instrucción Normativa de 2020 (IBAMA, 2020) extendió la autorización al Estado de Santa Catarina después de años de investigación (Figura 1 y Figura 2).

Los marcos legales más importantes según la Instrucción Normativa de 2020 (IBAMA, 2020), establecidos para personas naturales o jurídicas con fines de producción comercial, son:

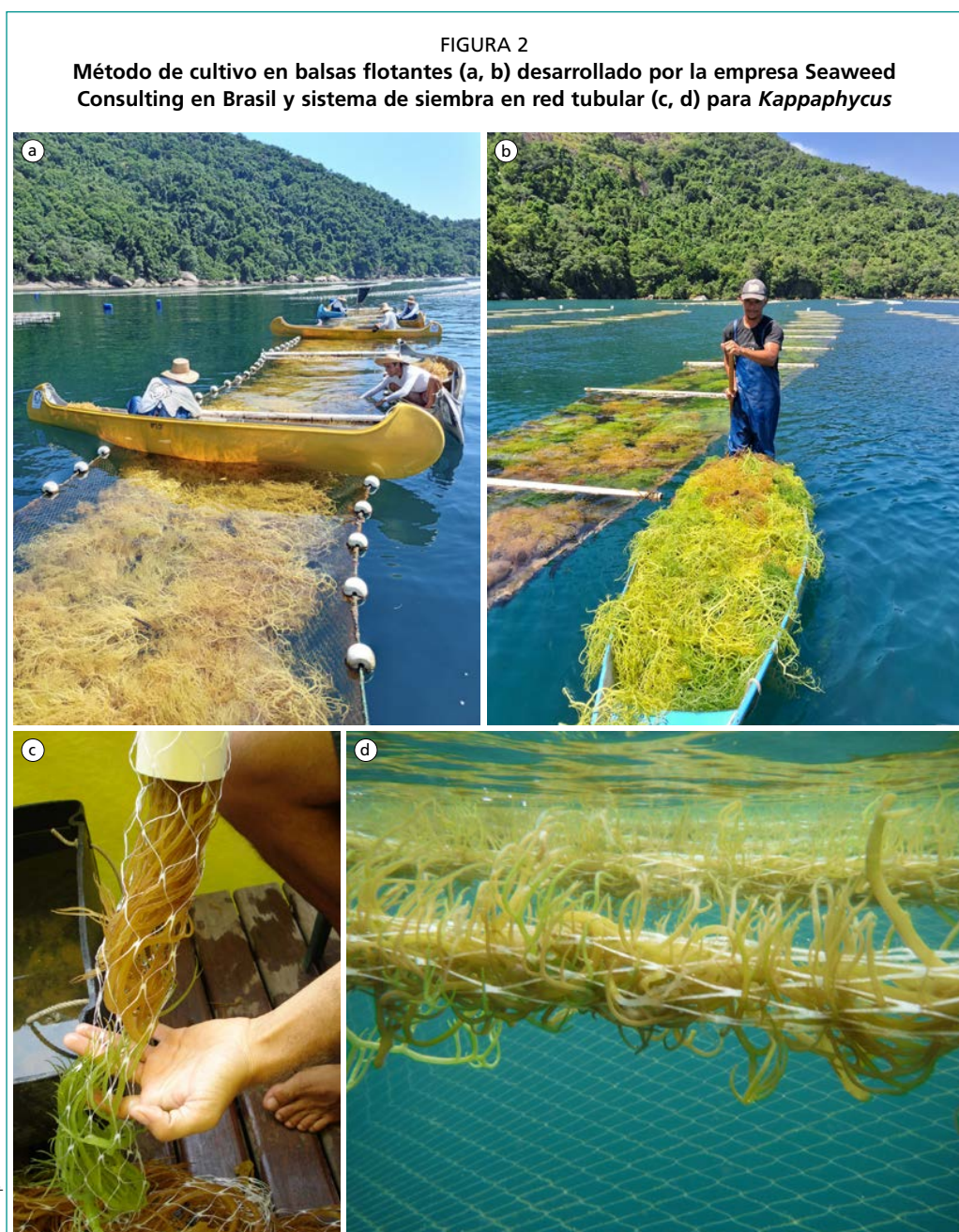


- Realizar monitoreo en el borde costero (playas y costas) circundantes al proyecto.
- Presentar un informe de monitoreo ambiental anual a la institución que otorga las licencias ambientales.
- El cultivo de *K. alvarezii* solo está permitido en ambientes con sustratos no consolidados y sin presencia de bancos naturales de otros organismos fotosintéticos.
- En bahías abiertas, la tasa máxima de ocupación de superficie permitida es del 10 % del área total, y en bahías cerradas (incluyendo estuarios), del 5 %.
- Instalación de los cultivos a 50 m de costas rocosas y 200 m de la línea media de bajamar en las playas.
- La liberación del cultivo de *Kappaphycus* fuera del área establecida en el Art. 1 solo se permitirá después de estudios y análisis de riesgo que comprueben su viabilidad ambiental y evalúen su potencial de invasión en la región.

La producción de *Kappaphycus* entre 2021 y 2023 alcanzó aproximadamente 800 toneladas húmedas en el Estado de Río de Janeiro y 402 toneladas húmedas en el Estado de Santa Catarina (M. Sepúlveda, comunicación personal, 2024).

República Bolivariana de Venezuela

En 1996, se introdujeron implantes de *K. alvarezii* y *Euclima denticulatum* desde Filipinas en la costa norte de la península de Araya e isla de Coche (Rincones y Rubio, 1999). El proyecto recibió apoyo gubernamental a través del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA) y la Fundación Desarrollo, Innovación y Capacitación Rural. Tras una fase experimental de dos años, ambas especies se adaptaron a las condiciones locales y se cultivaron comercialmente, exportando cerca de 150 toneladas de macroalgas secas a plantas procesadoras en Chile, Dinamarca y Francia entre los años 1999–2001 (Rincones y Rubio, 1999; Rincones, 2000; Smith y Rincones, 2006).



Según el Ministerio del Poder Popular de Pesca y Acuicultura, los marcos legales más importantes establecidos para personas naturales o jurídicas con fines de producción comercial son (Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, 2023):

- Queda prohibida la realización de actividades de cultivo de algas en espacios sensibles ambientalmente (caladeros de pesca, comunidades coralinas, de fanerógamas marinas, manglares, playas arenosas con fines recreativos, zonas turísticas, rutas de navegación, embalses).
- El cultivo de algas se realizará en zonas abiertas (marinas, estuarinas y continentales).
- En zonas abiertas, por unidades de producción: pequeña escala (menores o iguales a 1 hectareas); mediana escala (mayor a 1 hectareas y menor a 30 hectareas); gran escala (de 30 hectareas y hasta 60 hectareas).
- En zonas confinadas: pequeña escala (menores o iguales a 1 hectareas); mediana escala (mayor a 1 hectareas y menor a 30 hectareas); gran escala (de 30 hectareas y hasta 50 hectareas).

- El Ministerio del Poder Popular promoverá asistencia técnica y su financiamiento para los cultivos de pequeña y mediana escala.
- Para obtener la autorización de cultivo con fines comerciales, se debe presentar un proyecto ante el Ministerio para su evaluación y obtención del visto bueno técnico.
- Acreditación técnica del estudio del impacto ambiental y sociocultural.

La producción de la macroalga *Kappaphycus* comercializada entre 2022–2023 en la República Bolivariana de Venezuela fue de aproximadamente de 1 237 toneladas húmedas (Ministerio del Poder Popular de Pesca y Acuicultura, 2023).

El Ecuador

En el Ecuador, *Kappaphycus* fue introducida en 2011 por la empresa brasileña Seaweed Consulting en asociación con la empresa ECUAALGAS S.A. Las macroalgas se cultivaron en granjas de camarones con resultados positivos, lo que demostró su potencial para la producción en escala comercial (Figura 3). En 2014, el Viceministerio de Acuicultura y Pesca del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca (MAGAP) otorgó una concesión de cultivo de 10 ha en el mar a la Cooperativa de Producción Pesquera Artesanal de Santa Rosa por (Acuerdo Ministerial 449-2014), tras un estudio de impacto ambiental realizado en conjunto con el Instituto Nacional de Pesca (Neish *et al.*, 2017; Sepúlveda, 2014).

El MAGAP emitió el “Instructivo para el Ordenamiento, Control de Concesiones y Fomento de las Actividades de Maricultura en el Ecuador” (MAGAP, 2015, 2016, 2017). Este documento establece los requisitos para solicitar autorización y concesión marina según la normativa legal vigente. Actualmente, toda actividad acuícola que requiere concesiones marinas está regulada por la Ley Orgánica para el Desarrollo de la Acuicultura y la Pesca (Asamblea Nacional de la República de Ecuador, 2020). Entre 2021 y 2023, la Cooperativa de Producción Pesquera Artesanal de Santa Rosa produjo aproximadamente 106 toneladas húmedas de la macroalga *Kappaphycus*. Hasta la fecha, esta Cooperativa es la única entidad autorizada por el Gobierno para su cultivo y comercialización (Cooperativa Santa Rosa, comunicación personal, 2024).

Colombia

Implantes vegetativos de *Kappaphycus* fueron introducidos en Colombia desde Cuba a finales de la década de los 90 para evaluar su potencial como fuente



de carragenina. Los ensayos se realizaron en jaulas flotantes en dos ubicaciones: en el Centro de Investigación, Educación y Recreación (CEINER) en las Islas del Rosario (Cartagena) y en el Acuario Mundo Marino de la Universidad Jorge Tadeo Lozano en Santa Marta (Magdalena). Años después, Rincones y Gallo (2004) desarrollaron un cultivo de *Kappaphycus* en el Cabo de la Vela (La Guajira). Este proyecto, a pesar de sus excelentes perspectivas, no tuvo continuidad debido a problemas con los requerimientos legales para la producción de esta especie en aguas colombianas.

Cuba

Si bien la introducción y cultivo de *Kappaphycus* fueron exitosos en el año 2000, hasta la fecha no ha habido producción para poder exportar ni interés por parte de empresas locales o extranjeras en invertir en la actividad. Asimismo, las agencias gubernamentales tampoco se han mostrado interesadas en promover su desarrollo (Madrigal *et al.*, 1997). El marco legal de la política ambiental cubana que regula el aprovechamiento y manejo sostenible de los recursos pesqueros marinos es el Ministerio de la Industria Pesquera, en coordinación con el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente y demás órganos y organismos competentes (Gaceta Oficial de la República de Cuba, 1997).

Panamá

Entre 1998 y 1999, juveniles de *Kappaphycus*, originalmente procedentes de la República Bolivariana de Venezuela, fueron introducidas en la Provincia de Colón (Panamá) con fines experimentales. A partir de 2002, la empresa *Gracilarias* de Panamá realizó estudios para verificar el potencial de cultivo en las zonas costeras. Los resultados demostraron que el cultivo de *Kappaphycus* producía suficiente materia prima para exportación. Se comprobó que esta especie no tenía impacto ambiental alcanzando un crecimiento diario entre el 4 % y el 9 %.

La Autoridad de los Recursos de Panamá (ARAP) regula el ejercicio de toda actividad acuícola mediante autorización de concesiones marinas. Para la instalación del cultivo de *Kappaphycus* se debe presentar una solicitud ante el Ministerio de Ambiente de la República de Panamá, junto con un estudio de Impacto Ambiental Categoría II, según los lineamientos establecidos en el Decreto Ejecutivo N.º 1 del 1 de marzo de 2023.

La empresa Algas Panameñas S.A. creada en 2023, impulsa el proyecto “*Granjas de Algas Marinas en la Laguna de Chiriquí*” para la producción y exportación de *Kappaphycus*. El proyecto se desarrollará en la primera fase con un plan piloto en un área de 10 ha, donde se instalarán las primeras estructuras de cultivo (“*Balsas flotantes*”). El avance a las siguientes fases dependerá del éxito de esta primera etapa, con el objetivo de alcanzar 1 000 estructuras flotantes de cultivo de 225 m². Actualmente, no existen datos estadísticos oficiales sobre la producción de *Kappaphycus* proporcionados por el gobierno panameño.

México

Kappaphycus fue introducido en México en 1999 con cepas proporcionadas por Edison José de Paula (Muñoz, Freile-Peigrín y Robledo, 2004). Las macroalgas se mantuvieron en cuarentena durante tres años en el laboratorio de investigación del Cinvestav Unidad Mérida (México). El protocolo de cuarentena se basó en el Código Oficial Mexicano NOM-011-PESC-1993, propuesto para la introducción de eucheumatoides comerciales por Ask *et al.* (2003). Actualmente, no existen datos estadísticos oficiales sobre la producción de *Kappaphycus* en México.

En la actualidad, la acuicultura se rige por la Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentables (LGPAS), publicada en 2007, que busca promover, mejorar, ordenar y regular la actividad pesquera y acuícola a través de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) y la Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA). Las concesiones para actividades acuícolas comerciales son otorgadas

por la SADER, previo cumplimiento de los requisitos formales previstos en la LGPAS. Estas concesiones tienen una vigencia mínima de cinco años y máxima de 50 años, con posibilidad de prórroga por un periodo igual, sujeta a la presentación de un dictamen quinquenal ante el Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura (INAPESCA). La concesión puede ser revocada si se determina, mediante dictamen oficial, que las actividades afectan o ponen en riesgo inminente al ecosistema. Para las actividades de cultivo, introducción y repoblación de especies en cuerpos de agua de jurisdicción federal, se requiere un permiso oficial con una duración máxima de cinco años, siendo también la afectación al ecosistema motivo de revocación (Vázquez-Vera y Chávez-Carreño, 2022).

PREMISAS BÁSICAS PARA EL ESCALAMIENTO DE LOS CULTIVOS DE ALGAS *KAPPAPHYCUS* EN AMÉRICA LATINA

Para que el escalamiento de los cultivos de algas *Kappaphycus* en América Latina tenga éxito, son necesarias las siguientes premisas:

- Soporte y apoyo gubernamental, incluyendo los permisos y licencias necesarias para el desarrollo de la actividad.
- Disponibilidad de los recursos económicos necesarios para la operación del programa hasta alcanzar volúmenes comerciales.
- Diseño, gerencia y ejecución competente del proyecto para las labores de campo.
- Selección adecuada de áreas de cultivo para establecer las granjas marinas.
- Identificación de las principales limitaciones de los productores para ingresar al proyecto: capital de inversión, necesidades de capacitación y asistencia técnica y organización empresarial.
- Disponibilidades suficientes de semillas (implantes de macroalgas) adaptadas a las condiciones ecológicas y ambientales locales y a los sistemas de cultivo.
- Asistencia técnica y socio-empresarial continua, desde la instalación de los cultivos marinos hasta la fase comercial, con seguimiento que garantice la producción sostenida de materia prima y genere ingresos suficientes para satisfacer las demandas y necesidades socioeconómicas de los productores.
- Garantía de comercialización con precios justos y competitivos mediante contratos de compraventa a largo plazo en mercados estables y fiables.

CONCLUSIONES

A pesar del éxito de los cultivos de *Kappaphycus* en algunos países de América Latina, los gobiernos han invertido escasamente en investigar su capacidad de dispersión ambiental, tanto negativa como positiva, lo que permitiría ampliar la producción de esta especie. Trece países, incluyendo Costa Rica, El Salvador, Granada, Guatemala, Haití, Jamaica y la República Dominicana, tienen potencial para evaluar *Kappaphycus* a nivel experimental y piloto mediante un Protocolo de Monitoreo Ambiental. Esta iniciativa facilitaría la expansión de los cultivos a través de formación de investigadores especializados en manejo, extensión y conservación.

El monitoreo ambiental de la macroalga *Kappaphycus* se ha convertido en una nueva línea de trabajo en América Latina, impulsada por la creciente implementación de cultivos desarrollados bajo programas de gestión ambiental que ofrecen subsidios para su planificación y expansión. En la actualidad, varios países de la región desarrollan proyectos con inversión privada para la producción sostenible de *Kappaphycus* en colaboración con las comunidades costeras, sustituyendo así actividades extractivas. Aunque esta actividad genera empleo e ingresos para dichas comunidades, su éxito comercial depende de asegurar compradores permanentes. Asimismo, es esencial mantener un suministro suficiente y constante de biomasa de cultivo para garantizar el funcionamiento continuo de las plantas procesadoras de *Kappaphycus*.

REFERENCIAS

- Asamblea Nacional de la República de Ecuador. 2020. *Ley Orgánica para el Desarrollo de la Acuicultura y la Pesca (LODAP)*. Registro Oficial, Quito, el Ecuador.
- Ask, E., Batibasaga A., Zertuche-González, J.A. y de San, M. 2003. *Three decades of Kappaphycus alvarezii (Rhodophyta) introduction to non-endemic locations*. pp. 49–57. En: Chapman, A.R.O., Anderson, R.J., Vreeland, V.J., Davison, I.R. (eds.), Proceedings of the 17th International Seaweed Symposium, Ciudad del Cabo, Sudáfrica, del 28 de enero al 2 de febrero de 2001. https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture/culture-algues/FICHES_PLANTES/Kappaphycus%20alvarezii/Three%20decades%20of%20Kappaphycus%20alvarezii%20introductions.pdf
- Berger, C. 2020. La acuicultura y sus oportunidades para lograr el desarrollo sostenible en el Perú. *South Sustainability*, 1(1): 1–11. <https://doi.org/10.21142/SS-0101-2020-003>
- Castelar, B., Reis, R. y Bastos, M. 2009. Contribuição ao protocolo de monitoramento ambiental da maricultura de *Kappaphycus alvarezii* (Doty) Doty ex P.C. Silva (Areschougiaceae - Rhodophyta) na Baía de Sepetiba, RJ, Brasil. *Acta Bot. Bras.*, 23(3). <https://doi.org/10.1590/S0102-33062009000300001>
- FAO. 2020. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. La sostenibilidad en acción*. Roma, FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9229es>.
- Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela. 2023. AÑO CLI, mes III, n.º 42.787. <https://www.traviesoevens.com/travieso/wp-content/uploads/gacetas/2023/12-diciembre/2023-12-28-42787.pdf>
- Gaceta Oficial de la República de Cuba. 1997. Edición Extraordinaria. AÑO XCV, n.º 7: 47.
- IBAMA (Instituto Brasileño de Medio Ambiente y Recursos Naturales Renovables). 2008. *Instrução Normativa n.º 185*, de 22 de julho de 2008. Diário Oficial da União, n.º 140, Seção 1:60. https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Instrucao_normativa/2008/in_ibama_185_2008_permitircultivokappaphycus_alvarezii_rs_sc_revoga_in_ibama_165_2007.pdf
- IBAMA. 2020. Instrução Normativa N.º 1, de 21 de janeiro de 2020. En: IBAMA. Brasil. [Consultado el 5 de marzo de 2025]. <http://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=138683>
- Madrigal, A., Areces, A., Cano, M. y Bustamante, G. 1997. *Depredación sobre las carragenofitas comerciales Kappaphycus alvarezii (Doty) Doty y K. striatum (Schmitz) Doty (Rhodophyta: Gigartinales) introducidas en Cuba*.
- MAGAP (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca del Ecuador). 2015. *Acuerdo Ministerial n.º 23*. Quito, MAGAP. http://institutopesca.gob.ec/wp-content/uploads/2017/07/Acuerdo_N_023_.pdf
- MAGAP. 2016. *Acuerdo Ministerial n.º 100*. Manta, MAGAP. <https://institutopesca.gob.ec/wp-content/uploads/2017/07/Acuerdo-Ministerial-N%C2%B0-100.pdf>
- MAGAP. 2017. *Acuerdo Ministerial n.º 0001*. Manta, MAGAP. <https://institutopesca.gob.ec/wp-content/uploads/2017/07/ACUERDO-MINISTERIAL-No.-0001-2017-Categorizaci%C3%B3n-de-Especies-ilovepdf-compressed.pdf>
- Ministerio del Poder Popular de Pesca y Acuicultura. 2023. Gaceta Oficial Venezuela. En: *Tuacetaoficial.com*. la República Bolivariana de Venezuela. [Consultado el 5 de marzo de 2025]. <https://tuacetaoficial.com/gaceta-oficial-venezuela-42787-28-12-2023/>
- Muñoz, J., Freile-Pelegrín, Y. y Robledo, D. 2004. Mariculture of *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Solieriaceae) color strains in tropical waters of Yucatán, México. *Aquaculture*, 239(1–4): 161–177. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.05.043>
- Neish, I.C., Sepúlveda, M., Hurtado, A.Q. y Critchley, A.T. 2017. *Reflections on the commercial development of eucheumatoid seaweed farming*. En: Hurtado A.Q., Critchley A.T., Neish I.C. (eds.). *Tropical Seaweed Farming Trends, Problems and Opportunities: Focus on Kappaphycus and Eucheuma*. Cham (Suiza), Springer, pp. 1–27. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-63498-2_1

- Paula, E.J. y Pereira, R.T.L.** 1998. Cultivo de algas: Da “marinomia” a maricultura da alga exótica, *Kappaphycus alvarezii* (Doty) Doty ex. Silva (Rhodophyta) para produção de carragenanas no Brasil. *Panorama da Aqüicultura*, 8 (48): 10–15. <https://repositorio.usp.br/item/001000689>
- Rincones, R.E.** 2000. Marine agronomy: A sustainable alternative for coastal communities in developing countries. En: *Global Seafood Alliance*. Nuevo Hampshire. [Consultado el 5 de marzo de 2025]. <https://www.globalseafood.org/advocate/marine-agronomy-a-sustainable-alternative-for-coastal-communities-in-developing-countries/>
- Rincones, R.E. y Rubio, J.N.** 1999. Introduction and commercial cultivation of the red alga *Eucheuma* in Venezuela for the production of phycocolloids. *World Aquaculture Magazine*, 30: 57–61.
- Rincones, R.E. y Gallo, H.M.** 2004. *Programa de Capacitación en el cultivo de algas marinas “Jimoula” a las comunidades del Cabo de la Vela, Península de La Guajira*. Informe final del Proyecto Fortalecimiento para el desarrollo de empresas rurales a partir de productos de la biodiversidad en el Cabo de la Vela, Departamento de La Guajira. FAO TCP/COL/2901. Roma, FAO. 192 p.
- Sepúlveda, M.** 2014. *Ficha ambiental para el cultivo sostenible de Kappaphycus alvarezii*. Ministerio de Ambiente, Maricultura y Macroalgas en el Ecuador. <https://www.academia.edu/14894750/FICHA>
- Sepúlveda, M.** 2021. *La maricultura de la macroalga Kappaphycus alvarezii como apoyo al desarrollo social y económico en el Estado de Río de Janeiro, Brasil*. <https://aquahoy.com/maricultura-macroalga-kappaphycus-alvarezii-desarrollo-social-economico-rio-janeiro-brazil/>
- Smith, A.H. y Rincones, R.E.** 2006. *Seaweed resources of the Caribbean*. https://www.academia.edu/4731031/World_Seaweed_Resources_DVD_2006_Caribbean_Seaweed_Resources_Smith_and_Rincones
- Vázquez-Vera, L. y Chávez-Carreño, P. (eds.).** 2022. *Diagnóstico de la acuicultura en México*. México, Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, A.C. https://fmcn.org/uploads/publication/file/pdf/Libro%20Acuicultura_2022.pdf

El potencial rol de la acuicultura de macroalgas en un contexto de cambio climático

Pablo P. Leal y Luis A. Henríquez-Antipa

Instituto de Fomento Pesquero

Puerto Montt, Chile

Leal, P.P. y Henríquez-Antipa, L.A. 2025. *El potencial rol de la acuicultura de macroalgas en un contexto de cambio climático*. En: Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Murúa Andrade, P. y Farías Molina, A. (coords.). Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 24-26 de junio de 2024, Puerto Varas, Chile. *FAO Actas de Pesca y Acuicultura*. N.º 74. Roma, FAO. pp. 185-193.

RESUMEN

Los factores globales asociados al cambio climático —como el calentamiento y la acidificación oceánica causados por el aumento de CO₂ atmosférico— representan una amenaza para la vida en la Tierra. Estos cambios ambientales se ven exacerbados por perturbaciones locales, como la contaminación de zonas costeras, que comprometen actividades productivas como la acuicultura. Para abordar esta situación, se necesitan medidas de adaptación y mitigación al cambio climático a tanto a nivel global como local. Las macroalgas, que desempeñan un papel fundamental en los ecosistemas costeros, pueden servir como herramienta para mitigar los efectos del cambio climático en la acuicultura, contribuyendo así a la seguridad alimentaria y nutricional global. Este documento explora el potencial de la acuicultura de macroalgas para mitigar los impactos de las actividades humanas en los ecosistemas costeros en un contexto de cambio climático, con un enfoque específico en su aplicación en Chile.

INTRODUCCIÓN

Importancia de las macroalgas

Las macroalgas contribuyen entre el 5 y el 10 % de la productividad primaria marina total (Charpy-Roubaud y Sournia, 1990) y constituyen los componentes basales de las redes tróficas costeras (Steneck *et al.*, 2002). Las macroalgas proporcionan un espacio tridimensional que otros organismos utilizan como refugio contra depredadores, áreas de pastoreo y crianza. Su presencia también influye en las condiciones hidrodinámicas locales, modificando tanto, los patrones de reclutamiento de invertebrados y macroalgas, como la precipitación de los sedimentos y erosión costera (Hurd *et al.*, 2014). Durante su ciclo de vida, las macroalgas son susceptibles a alteraciones fisicoquímicas asociadas al cambio climático y perturbaciones locales (como la eutroficación y especiación de metales), las cuales pueden tener consecuencias sobre el crecimiento, reproducción y distribución geográfica (Harley *et al.*, 2012; Wernberg *et al.*, 2024). Por lo tanto, en este contexto ambiental la acuicultura de macroalgas depende en gran medida de los cambios fisicoquímicos en su hábitat natural. Esta situación genera una necesidad urgente de minimizar los impactos del cambio climático y sus factores asociados sobre el desempeño productivo y el desarrollo del cultivo de macroalgas a nivel global.

La población mundial supera actualmente los 8 000 millones de personas y se estima que supere los 10 000 millones para el año 2100 (FAO, 2024). El aumento de la población mundial ha intensificado la demanda de alimentos, siendo los océanos esenciales para garantizar la seguridad alimentaria y nutricional presente y futura (Costa-Pierce, 2016). En este contexto, la acuicultura a nivel global ha experimentado una rápida expansión, alcanzando los 122,6 millones de toneladas en 2020, distribuidas entre 87,5 millones de toneladas de animales acuáticos y 35,1 millones de toneladas de macroalgas (FAO, 2022) con Chile en América, China en Asia y Noruega en Europa (FAO, 2022) como los principales productores. Mientras, la tendencia global muestra la relevancia del cultivo de macroalgas en las últimas décadas, paralelamente, la evidencia científica ha demostrado que los servicios ecosistémicos derivados del cultivo de macroalgas contribuirán a sostener la industria frente al cambio climático.

Cambio climático

El incremento de la concentración de CO_2 atmosférico proveniente de la actividad antropogénica iniciada en la era industrial es la principal amenaza para la vida en la Tierra. Las concentraciones de CO_2 atmosférico han aumentado desde 280 μatm en la era preindustrial hasta niveles actuales de 425 μatm (NASA, 2023), y se proyecta una concentración de 800 μatm de CO_2 para el final de este siglo (IPCC, 2021). Este incremento tiene dos consecuencias principales: el calentamiento global y la acidificación oceánica, que afectarán íntegramente a los ecosistemas marinos (Kroeker *et al.*, 2013; Krumhansl *et al.*, 2016) y a las actividades humanas basadas en éstos (FAO, 2020). Cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera, calentando la superficie terrestre, la radiación termal que es emitida por la superficie es absorbida por los gases de efecto invernadero (CO_2 incluido) dentro de la atmósfera (IPCC, 2021). Como consecuencia, la temperatura superficial de la Tierra ha aumentado 1,17 °C entre 1850 y 2023 (NASA, 2023). Debido a que los océanos han acumulado más del 91 % de la energía solar entre 1910 y 2018, la temperatura superficial (0–75m) ha aumentado en 0,11 °C cada década durante el mismo periodo (IPCC, 2021). De no implementarse medidas de mitigación, se proyecta un aumento de hasta 4 °C para el año 2100 (IPCC, 2021).

El otro fenómeno asociado con el cambio climático es la acidificación oceánica (Caldeira y Wickett, 2003), producida por la absorción de cerca de un cuarto del CO_2 antropogénico emitido a la atmósfera (IPCC, 2021). Cuando el CO_2 se disuelve en el agua de mar ($\text{CO}_{2(\text{aq})}$), reacciona con el agua (H_2O) para formar ácido carbónico (H_2CO_3), el cual se disocia para formar bicarbonato (HCO_3^-) o carbonato (CO_3^{2-}), liberando cationes de hidrógeno (H^+) en ambos casos. Simultáneamente, los H^+ pueden reaccionar con los CO_3^{2-} para formar HCO_3^- . Por lo tanto, los cambios químicos producidos durante la acidificación oceánica son un incremento en la concentración de $\text{CO}_{2(\text{aq})}$, H_2CO_3 , HCO_3^- y H^+ , y una disminución en la concentración de CO_3^{2-} . El aumento de la concentración de H^+ resulta en la disminución de pH del agua de mar superficial. Desde la era preindustrial hasta la actualidad, el pH oceánico promedio ha disminuido desde 8,16 hasta 8,06, proyectándose un valor cercano a 7,70 para el año 2100 sin procesos de mitigación (IPCC, 2021).

Contaminación costera

Los nutrientes presentes en el océano se clasifican según su concentración (Roleda y Hurd, 2019). Los macronutrientes como el nitrógeno (N) y fósforo (P) están presentes en concentraciones mayores a 10 $\mu\text{mol/kg}$, mientras que los micronutrientes o metales traza como el Cu, Fe y Zn muestran concentraciones entre 0,5 $\mu\text{mol/kg}$ y 10 $\mu\text{mol/kg}$ (Bruland y Lohan, 2003; Morel y Price, 2003). En las concentraciones adecuadas, macro y micronutrientes son esenciales para el crecimiento, reproducción, fotosíntesis y respiración de las macroalgas (Davis, Volesky y Mucci, 2003; Hurd *et al.*, 2014). No obstante, debido a las actividades antrópicas la concentración de

macro y micronutrientes en zonas costeras puede aumentar drásticamente debido a actividades antropogénicas, volviéndose tóxicas para las macroalgas (Davis, Volesky y Mucci, 2003; Harrison y Hurd, 2001). Sin embargo, las macroalgas son capaces bioabsorber y bioacumular macro y micronutrientes, convirtiéndolas en herramientas de biorremediación de ambientes contaminados (Chugh *et al.*, 2022).

La eutroficación y la contaminación por metales en zonas costeras también están asociadas a la acidificación oceánica (Millero *et al.*, 2009; Zeng, Chen y Zhuang, 2015). La eutroficación es el aporte excesivo de nutrientes inorgánicos (por ejemplo, N y P), provenientes de actividades humanas (como aguas residuales, fertilizantes químicos, acuicultura intensiva) hacia ecosistemas acuáticos (Wei *et al.*, 2023). Las fuentes antropogénicas de nutrientes inorgánicos han duplicado la concentración natural de N y triplicado la de P en ambientes eutrofizados (Ramesh *et al.*, 2014) lo que puede generar floraciones descontroladas de macro y microalgas, lo que a su vez produce un exceso de materia orgánica. Esta materia orgánica es degradada por bacterias, consumiendo oxígeno (O_2) y produciendo $CO_{2(aq)}$. En consecuencia, además de promover la hipoxia, la eutroficación reduce el pH del agua de mar en la zona afectada contribuyendo una fuente adicional de $CO_{2(aq)}$, por lo que se exacerba la acidificación oceánica (Zeng, Chen y Zhuang, 2015).

La disminución de la concentración de CO_3^{2-} en el agua de mar asociada a la acidificación oceánica afectará la especiación de metales inorgánicos en el agua de mar (Zeng, Chen y Zhuang, 2015). Este anión puede formar enlaces fuertes con cationes (por ejemplo, Cu^{2+} , Fe^{2+} y Zn^{2+}), por lo que la menor disponibilidad de CO_3^{2-} aumentará la concentración de cationes metálicos bajo condiciones de acidificación oceánica (Zeng, Chen y Zhuang, 2015). Por ejemplo, la concentración de Cu^{2+} incrementará en más de un 30 % bajo las condiciones de acidificación proyectadas para el año 2100 (Millero *et al.*, 2009). Sin embargo, los metales también están asociados a materia orgánica disuelta en el agua de mar (Zeng, Chen y Zhuang, 2015). Por ejemplo, > 98 % del cobre, cobalto, hierro y zinc están enlazados a moléculas orgánicas con cargas negativas (ligandos). En consecuencia, el incremento en las concentraciones de cationes (por ejemplo, H^+ , Cu^{2+}) debido a la acidificación oceánica resultará en una menor disponibilidad de sitios activos en los ligandos para enlazar cationes metálicos (Millero *et al.*, 2009; Zeng, Chen y Zhuang, 2015). Estos cambios en la especiación de metales inorgánicos y orgánicos son relevantes ya que los cationes metálicos son tóxicos para la biota marina a altas concentraciones.

Las macroalgas tienen la capacidad de reducir la contaminación costera producida por la eutroficación y los metales disueltos en el agua de mar proveniente de actividades humanas. En la actualidad, la ciencia se ha enfocado en el uso de los cultivos de macroalgas como una solución a los impactos del cambio climático, debido a su capacidad de captar y almacenar CO_2 en sus tejidos. Este documento analiza el potencial de la acuicultura de macroalgas como herramienta para mitigar los impactos de las actividades antropogénicas sobre los ecosistemas costeros en un contexto de cambio climático y su aplicación en Chile.

CULTIVO DE MACROALGAS COMO HERRAMIENTA DE MITIGACIÓN

Acuicultura multitrófica integrada

El desarrollo globalizado de la acuicultura intensiva de peces está asociada a impactos ambientales críticos en el medio acuático, como la liberación de los desechos orgánicos e inorgánicos desde los sistemas de cultivo (Buschmann *et al.*, 2008a). En este contexto nace el concepto de acuicultura multitrófica integrada (AMTI), que integra la acuicultura de organismos alimentados artificialmente (como peces) con organismos extractivos (como macroalgas y bivalvos) para proveer servicios ecosistémicos como la biorremediación ambiental (Chopin *et al.*, 2001). En la AMTI, los bivalvos se alimentan

de heces y del alimento no consumido del cultivo de peces, mientras que las macroalgas aprovechan los desechos inorgánicos disueltos de los peces y bivalvos (N, P y $\text{CO}_{2(\text{aq})}$) para su fotosíntesis y crecimiento (Chopin *et al.*, 2001). Por lo tanto, la AMTI tiene la capacidad de biorremediar nutrientes ya que evita su disolución en la columna de agua y los convierte en biomasa animal y vegetal. Por ejemplo, *Gracilaria chilensis* y *Macrocystis pyrifera* cultivadas cerca de cultivos de salmónidos muestran mayor crecimiento y contenido de N que macroalgas en sitios sin cultivos de peces (Abreu *et al.*, 2009; Buschmann *et al.*, 2008b; Varela *et al.*, 2018). En acuicultura terrestre de peces y moluscos, especies como *Ulva*, *Gracilaria* y *Saccharina* han funcionado como biofiltros eficaces para reducir el exceso de N y P (Macchiavello y Bulboa, 2014; Mawi *et al.*, 2020). Esta práctica beneficia al ambiente donde se desarrolla acuicultura intensiva, y a su vez, provee beneficios económicos y sociales para la industria (Buschmann *et al.*, 2008a; Chopin *et al.*, 2001). Además, la tecnología desarrollada para AMTI es genérica y modular, lo que permite combinar distintos organismos alimentados y extractivos, tanto en mar como en tierra, a diferentes escalas (Buschmann *et al.*, 2008a).

Adicionalmente, los cultivos de macroalgas en áreas costeras sujetas a la acuicultura intensiva han mostrado efectividad para la biorremediación de metales en agua y sedimentos. Por ejemplo, la biomasa de *Sargassum hemiphyllum* y *S. henslowianum* cultivada cerca de jaulas de peces casi triplicó su contenido de metales (Cu, Zn, Pb, y Cr) en comparación con las mismas especies en praderas naturales (Yu *et al.*, 2014). De manera similar, cultivos de *Laminaria digitata* junto a jaulas de salmónidos en el océano abierto acumularon mayor contenido de metales (Cu, Mn y V) en comparación a monocultivos de la macroalga (Ratcliff *et al.*, 2016). La concentración de metales en sedimentos resultó ser menor bajo cultivos de *Gracilaria lemaneiformis* en comparación al sedimento bajo cultivo de peces, y el contenido de metales en el tejido de la macroalga también fue mayor (Luo *et al.*, 2020). Por lo tanto, los cultivos de macroalgas también presentan potencial para biorremediar zonas costeras contaminadas con metales. Sin embargo, se ha descrito una reducción de 75 % en la supervivencia de pastoreadores como *Peramphitoe permerong* alimentados con *Sargassum* sp. con alto contenido de cobre (Roberts, Johnston y Poore, 2008). En consecuencia, es fundamental establecer regulaciones que requieran análisis detallados de la composición química de las macroalgas y regulen su uso para consumo humano o animal (Rubio *et al.*, 2017).

Cocultivo de especies extractivas

El cocultivo a pequeña escala es otro tipo de AMTI que busca cultivar exclusivamente especies extractivas que se benefician mutuamente al aprovechar los desechos metabólicos producidos por cada una (Fernández, Leal y Henríquez, 2019). Simultáneamente, la actividad fotosintética de las macroalgas genera un refugio químico en donde el proceso de calcificación de bivalvos queda protegido ante efectos negativos de un ambiente acidificado (Fernández, Leal y Henríquez, 2019). Cocultivos experimentales han demostrado que la producción de valvas de la almeja *Mercenaria mercenaria*, la ostra *Crassostrea virginica*, el ostión *Argopecten irradians* fue mitigada por la actividad fotosintética de *Saccharina latissima* y *Ulva* sp. (Young *et al.*, 2022; Young y Gobler, 2018). Además, la interacción entre el ostión *Chlamys farreri*, la ostra *Crassostrea gigas* y macroalgas como *S. japonica* y *Gracilaria lemaneiformis* demuestran la incorporación de tejido macroalgal a la dieta de los bivalvos del cocultivo mejorando índices productivos de las especies involucradas (Jiang *et al.*, 2013; Mao *et al.*, 2009; Xu, Gao y Yang, 2016). Si bien estas experiencias han sido desarrolladas a escala comercial casi exclusivamente en Asia (Spillias *et al.*, 2023), se evidencia que las macroalgas en conjunto con bivalvos podrían ser adoptados por la acuicultura de occidente. En Chile, el cultivo puede ser adoptado por la acuicultura a pequeña escala (APE) de bivalvos, incorporando macroalgas a las estructuras de cultivo. Esto permitiría que pequeños acuicultores obtengan beneficios socio-ecológicos al diversificar la actividad comercial

local y promoviendo a su vez los beneficios y servicios ecosistémicos de las especies extractivas.

Remoción y secuestro de CO₂

La evidencia científica señala que es necesario reducir drásticamente las emisiones de CO₂, y el CO₂ presentes en la atmósfera. Se estima que para mantener el calentamiento global bajo los 2 °C es necesario remover 100-1000 Gt de CO₂ atmosférico durante este siglo (IPCC, 2021). El proceso de reducción de CO₂ atmosférico y su almacenamiento en reservorios geológicos, terrestres y oceánicos, o en productos, de manera segura, confiable, verificable y a largo plazo (> 100 años) se conoce como remoción de dióxido de carbono (Hurd, Gattuso y Boyd, 2023). Este secuestro de carbono debería bloquear permanentemente el reingreso de CO₂ a la atmósfera (Smith *et al.*, 2023). Las principales estrategias de dióxido de carbono utilizando macroalgas incluyen: la expansión de su cultivo al océano abierto (aforestación oceánica de macroalgas), la reforestación de ecosistemas de macroalgas diezmados o sobreexplotados, principalmente grandes poblaciones de algas pardas (Boyd *et al.*, 2022), y la conservación de los ecosistemas existentes (Pessarrodona *et al.*, 2024; Ross *et al.*, 2023). La biomasa resultante podría utilizarse como materia prima para la producción de bioetanol vía digestión anaeróbica, reduciendo el CO₂ atmosférico (N'Yeurt *et al.*, 2012). Se estima que la aforestación oceánica de macroalgas de solo el 9 % de los ambientes costeros del planeta podría producir 12 000 millones de toneladas de biometano año⁻¹, mientras se almacenan 19 000 millones de toneladas de CO₂ año⁻¹ con la producción del biogás y capturando, además, ~34 000 millones de toneladas de carbono año⁻¹ con la combustión del gas (N'Yeurt *et al.*, 2012; Yong *et al.*, 2022). A pesar de este potencial, el costo para escalar cultivos acordes a la producción y la demanda de una economía basada en biocombustible macroalgal es actualmente poco rentable (Yu *et al.*, 2017). Se necesitan avances en el valor agregado de la biomasa y en bioingeniería para mejorar los procesos de la digestión anaeróbica, fermentación y procesos de licuefacción hidrotermal, para mejorar la rentabilidad de cultivos masivos para producción de biocombustibles. Por otro lado, también es crucial identificar y seleccionar especies de alto contenido de lípidos y carbohidratos de alto grado de saturación (como los ácidos grasos C16–C18), y optimizar la producción de biomasa en diferentes latitudes y ambientes. Por otro lado, la ocupación de grandes espacios marinos para crecimiento de macroalgas puede tener efectos en la fisiología microbiana y en la ecología y la química oceánica (Boyd *et al.*, 2022). Por ejemplo, el suministro de hierro disuelto (dFe) en el océano abierto, factor limitante para el crecimiento del fitoplancton, podría ser una barrera para la aforestación oceánica de macroalgas ya que el Fe disuelto es 1 000 veces menor del requerido para el crecimiento de *M. pyrifera* (Paine *et al.*, 2023).

CONCLUSIONES

La preocupación por la seguridad alimentaria y nutricional ante el cambio climático, la degradación y sobreexplotación del ecosistema, y los efectos ecológicos negativos en la acuicultura ha derivado en el desarrollo de nuevos enfoques ecológicos para lograr interacciones más sostenibles entre la acuicultura y el ambiente (Costa-Pierce, 2016). Por ejemplo, la mitigación ambiental mientras se cumplen objetivos productivos a través de la acuicultura multitrófica integrada de peces y macroalgas (Buschmann *et al.*, 2008a; Chopin *et al.*, 2001), bivalvos y peces (Jiang *et al.*, 2015; Mao *et al.*, 2009) y bivalvos y macroalgas (Mao *et al.*, 2009; Tang, Zhang y Fang, 2011) han demostrado que el manejo de muchas formas de cultivo podría cumplir con objetivos de sostenibilidad ambiental. Mas aún, la generación de servicios ecosistémicos derivados de la acuicultura como la liberación de O₂, la remoción de nutrientes y la creación de hábitats, entre otros (Alleway *et al.*, 2018; Theuerkauf *et al.*, 2021), enfatiza el potencial de la acuicultura como herramienta de conservación frente a los estresores actuales (Froehlich, Gentry y

Halpern, 2017). La implementación efectiva del enfoque ecosistémico en la acuicultura dependerá del diseño de nuevos métodos productivos y manejo espacial estratégico donde el cultivo de múltiples especies satisfaga las necesidades alimentarias de la sociedad, y minimicen los efectos negativos favoreciendo tanto interacciones tróficas, como, las funciones de las especies preservando los servicios ambientales que sustentan la productividad natural (Froehlich, Gentry y Halpern, 2017).

REFERENCIAS

- Abreu, M.H., Varela, D.A., Henríquez, L.A., Villarroel, A., Yarish, C., Sousa-Pinto, I. y Buschmann, A.H. 2009. Traditional vs. integrated multi-trophic aquaculture of *Gracilaria chilensis* C.J. Bird, J. McLachlan y E.C. Oliveira: *productivity and physiological performance*. *Aquaculture*, 293: 211–220. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.03.043>
- Alleway, H., Gillies, C., Bishop, M., Gentry, R., Theuerkauf, S. y Jones, R. 2018. The ecosystem services of marine aquaculture: Valuing benefits to people and nature. *BioScience*, 69. <https://doi.org/10.1093/biosci/biy137>
- Boyd, P.W., Bach, L.T., Hurd, C.L., Paine, E.R., Raven, J.A. y Tamsitt, V. 2022. Potential negative effects of ocean afforestation on offshore ecosystems. *Nature Ecology & Evolution*, 6: 675–683. <https://doi.org/10.1038/s41559-022-01722-1>
- Bruland, K.W. y Lohan, M.C. 2003. *Controls of trace metals in seawater*. En: *Treatise on Geochemistry*. pp. 23–47. Vol. 6. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00602-1>
- Buschmann, A.H., Hernández-González, M.C., Aranda, C.P., Chopin, T., Neori, A., Halling, C. y Troell, M. 2008a. *Mariculture Waste Management*. En: S.E. Jorgensen & B.D. Fath, eds. *Applications in Ecological Engineering*. pp. 2211–2217. Oxford, Elsevier. <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=aRKO6ZazC8UC&oi=fnd&pg=PA318&dq=Mariculture+Waste+Management&ots=R0z3Paz7Zi&sig=fmYskZH25PuSYKmdtKxTCCVYWEU>
- Buschmann, A.H., Varela, D.A., Hernández-González, M.C. y Huovinen, P. 2008b. Opportunities and challenges for the development of an integrated seaweed-based aquaculture activity in Chile: Determining the physiological capabilities of *Macrocystis* and *Gracilaria* as biofilters. *Journal of Applied Phycology*, 20: 571–577. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9619-8_17
- Caldeira, K. y Wickett, M.E. 2003. Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature*, 425: 365. <https://doi.org/10.1038/425365a>
- Charpy-Roubaud, C. y Sournia, A. 1990. The comparative estimation of phytoplanktonic, microphytobenthic and macrophytobenthic primary production in the oceans. *Marine Microbial Food Webs*, 4(1): 31–57. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_31-32/34226.pdf
- Chopin, T., Buschmann, A.H., Halling, C., Troell, M., Kautsky, N., Neori, A. y Kraemer, G.P., Zertuche-González, J.A., Yarish, C. y Neefus, C. 2001. Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: a key toward sustainability. *Journal of Phycology*, 37: 975–986. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2001.01137.x>
- Chugh, M., Kumar, L., Shah, M.P. y Bharadvaja, N. 2022. Algal Bioremediation of heavy metals: An insight into removal mechanisms, recovery of by-products, challenges, and future opportunities. *Energy Nexus*, 7: 100129. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100129>
- Costa-Pierce, B.A. 2016. Ocean foods ecosystems for planetary survival in the anthropocene. *World Nutrition Forum*: 301–320.
- Davis, T.A., Volesky, B. y Mucci, A. 2003. A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. *Water Research*, 37: 4311–4330. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00293-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00293-8)

- FAO. 2020. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. Sostenibilidad en acción*. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca9229en>
- FAO. 2022. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022. Hacia una transformación azul*. Roma. <https://policycommons.net/artifacts/8945635/the-state-of-world-fisheries-and-aquaculture/9788497/>
- FAO. 2024. Datos sobre alimentación y agricultura. En: *FAOSTAT*. Roma. [Consultado el 1 de noviembre de 2024]. <https://www.fao.org/faostat/es/#home>
- Fernández, P.A., Leal, P.P. y Henríquez, L.A. 2019. *Co-culture in marine farms: macroalgae can act as chemical refuge for shell-forming molluscs under an ocean acidification scenario*. *Phycologia*, 58(5): 542–551. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1628576>
- Froehlich, H.E., Gentry, R.R. y Halpern, B.S. 2017. *Conservation aquaculture: Shifting the narrative and paradigm of aquaculture's role in resource management*. *Biological Conservation*, 215: 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.09.012>
- Harley, C.D.G., Anderson, K.M., Demes, K.W., Jorve, J.P., Kordas, R.L., Coyle, T.A. y Graham, M.H. 2012. *Effects of climate change on global seaweed communities*. *Journal of Phycology*, 48: 1064–1078. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2012.01224.x>
- Harrison, P.J. y Hurd, C.L. 2001. Nutrient physiology of seaweeds: application of concepts to aquaculture. *Cahiers de Biologie Marine*, 42: 71–82. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000168120500008>
- Hurd, C.L., Gattuso, J.-P. y Boyd, P.W. 2023. Air-sea carbon dioxide equilibrium: Will it be possible to use seaweeds for carbon removal offsets? *Journal of Phycology*, 60(1): 4–14. <https://doi.org/10.1111/jpy.13405>
- Hurd, C.L., Harrison, P.J., Bischof, K. y Lobban, C.S. 2014. *Seaweed ecology and physiology*. Second Edition. Cambridge, Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139192637>
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud et al., eds. Cambridge, United Kingdom and New York, Nueva York, Estados Unidos de América, Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jiang, Z., Li, J., Qiao, X., Wang, G., Bian, D., Jiang, X., Liu, Y., Daji Huang, D., Wang, W. y Fang, J. 2015. The budget of dissolved inorganic carbon in the shellfish and seaweed integrated mariculture area of Sanggou Bay, Shandong, China. *Aquaculture*, 446: 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.12.043>
- Jiang, Z., Wang, G., Fang, J. y Mao, Y. 2013. Growth and food sources of Pacific oyster *Crassostrea gigas* integrated culture with Sea bass *Lateolabrax japonicus* in Ailian Bay, China. *Aquaculture International*, 21. <https://doi.org/10.1007/s10499-012-9531-7>
- Kroeker, K.J., Kordas, R.L., Crim, R.N., Hendriks, I.E., Ramajo, L., Singh, G.S., Duarte, C.M. y Gattuso, J.-P. 2013. Impacts of ocean acidification on marine organisms: Quantifying sensitivities and interaction with warming. *Global Change Biology*, 19: 1884–1896. <https://doi.org/10.1111/gcb.12179>
- Krumhansl, K.A., Okamoto, D.K., Rassweiler, A., Novak, M., Bolton, J.J., Cavanaugh, K.C., Connell, S.D., et al. 2016. Global patterns of kelp forest change over the past half-century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(48): 13785–13790. <https://doi.org/10.1073/pnas.1606102113>
- Luo, H., Wang, Q., Liu, Z., Wang, S., Long, A. y Yang, Y. 2020. Potential bioremediation effects of seaweed *Gracilaria lemaneiformis* on heavy metals in coastal sediment from a typical mariculture zone. *Chemosphere*, 245: 125636. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125636>

- Macchiavello, J.E. y Bulboa, C.R. 2014. Nutrient uptake efficiency of *Gracilaria chilensis* and *Ulva lactuca* in an IMTA system with the red abalone *Haliotis rufescens*. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 42(3): 523–533. <https://doi.org/10.3856/vol42-issue3-fulltext-12>
- Mao, Y., Yang, H., Zhou, Y., Ye, N. y Fang, J. 2009. Potential of the seaweed *Gracilaria lemaneiformis* for integrated multi-trophic aquaculture with scallop *Chlamys farreri* in North China. *Journal of Applied Phycology*, 21: 649–656. <https://doi.org/10.1007/s10811-008-9398-1>
- Mawi, S., Krishnan, S., Din, M.F.M.D., Arumugam, N. y Chelliapan, S. 2020. Bioremediation potential of macroalgae *Gracilaria edulis* and *Gracilaria changii* co-cultured with shrimp wastewater in an outdoor water recirculation system. *Environmental Technology & Innovation*, 17: 100571. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100571>
- Millero, F.J., Woosley, R., DiTrollo, B.R. y Waters, J. 2009. Effects of the ocean acidification on the speciation of metals in seawater. *Oceanography*, 22(4): 72–85. <https://pdfs.semanticscholar.org/316f/423fefe4525466c9b8420b3135ee1725b6c8.pdf>
- Morel, F.M.M. y Price, N.M. 2003. The biogeochemical cycles of trace metals in the oceans. *Science*, 300: 944–947. <https://doi.org/10.1126/science.1083545>
- N'Yeurt, A. de R., Chynoweth, D.P., Capron, M.E., Stewart, J.R. y Hasan, M.A. 2012. Negative carbon via Ocean Afforestation. *Process Safety and Environmental Protection*, 90(6): 467–474. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.10.008>
- NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio). 2023. *Global Climate Change. Vital Signs of the Planet*. [Consultado el 27 de febrero 2025]. <https://climate.nasa.gov/>
- Paine, E.R., Boyd, P.W., Strzepek, R.F., Ellwood, M., Brewer, E.A., Diaz-Pulido, G., Schmid, M. y Hurd, C.L. 2023. Iron limitation of kelp growth may prevent ocean afforestation. *Communications Biology*, 6(1): 1–10. <https://doi.org/10.1038/s42003-023-04962-4>
- Pessarrodona, A., Howard, J., Pidgeon, E., Wernberg, T. y Filbee-Dexter, K. 2024. Carbon removal and climate change mitigation by seaweed farming: A state of knowledge review. *Science of the Total Environment*, 918: 170525. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170525>
- Ramesh, R., Lakshmi, A., Purvaja, R., Costanzo, S.D., Kelsey, R.H., Hawkey, J., Datta, A. y Dennison, W.C. 2014. Policy brief: Eutrophication and Ocean Acidification. A joint publication of GPNM, NCSCM, and IAN/UMCES. <https://doi.org/10.1890/100008.19>
- Ratcliff, J.J., Wan, A.H.L., Edwards, M.D., Soler-Vila, A., Johnson, M.P., Abreu, M.H. y Morrison, L. 2016. Metal content of kelp (*Laminaria digitata*) co-cultivated with Atlantic salmon in an Integrated Multi-Trophic Aquaculture system. *Aquaculture*, 450: 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.07.032>
- Roberts, D.A., Johnston, E.L. y Poore, A.G.B. 2008. Biomonitors and the assessment of ecological impacts: distribution of herbivorous epifauna in contaminated macroalgal beds. *Environmental Pollution*, 156: 489–503. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.01.012>
- Roleda, M.Y. y Hurd, C.L. 2019. Seaweed nutrient physiology: application of concepts to aquaculture and bioremediation. *Phycologia*, 58(5): 552–562. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1622920>
- Ross, F.W.R., Boyd, P.W., Filbee-Dexter, K., Watanabe, K., Ortega, A., Krause-Jensen, D., Lovelock, C.E., et al. 2023. Potential role of seaweeds in climate change mitigation. *Science of the Total Environment*, 885: 163699. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163699>
- Rubio, C., Napoleone, G., Luis-González, G., Gutiérrez, A.J., González-Weller, D., Hardisson, A. y Revert, C. 2017. Metals in edible seaweed. *Chemosphere*, 173: 572–579. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.064>

- Smith, S.M., Geden, O., Nemet, G., Gidden, M., Lamb, W.F., Powis, C., Bellamy, R., *et al.* 2023. *The State of Carbon Dioxide Removal – 1st Edition*. The State of Carbon Dioxide Removal. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/W3B4Z>
- Spillias, S., Kelly, R., Cottrell, R., O'Brien, K., Im, R.-Y., Kim, J., Lei, C., *et al.* 2023. The empirical evidence for the social-ecological impacts of seaweed farming. *PLOS Sustainability and Transformation*, 2: e0000042. <https://doi.org/10.1371/journal.pstr.0000042>
- Steneck, R.S., Graham, M.H., Bourque, B.J., Corbett, D., Erlandson, J.M., Estes, J.A. y Tegner, M.J. 2002. Kelp forest ecosystems: biodiversity, stability, resilience and future. *Environmental Conservation*, 29(4): 436–459. <https://doi.org/10.1017/S0376892902000322>
- Tang, Q., Zhang, J. y Fang, J. 2011. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO₂ absorption by coastal ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*, 424(Dic): 97–104. <https://doi.org/10.3354/meps08979>
- Theuerkauf, S., Barrett, L., Alleway, H., Costa-Pierce, B., St. Gelais, A. y Jones, R. 2021. Habitat value of bivalve shellfish and seaweed aquaculture for fish and invertebrates: Pathways, synthesis and next steps. *Reviews in Aquaculture*, 14. <https://doi.org/10.1111/raq.12584>
- Varela, D.A., Hernández, L.A., Fernández, P.A., Leal, P.P., Hernández-González, M.C., Figueroa, F.L. y Buschmann, A.H. 2018. Photosynthesis and nitrogen uptake of the giant kelp *Macrocystis pyrifera* (Ochrophyta) grown close to salmon farms. *Marine Environmental Research*, 135: 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2018.02.002>
- Wei, Y., Ding, D., Gu, T., Xu, Y., Sun, X., Qu, K., Sun, J. y Cui, Z. 2023. Ocean acidification and warming significantly affect coastal eutrophication and organic pollution: A case study in the Bohai Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 186: 114380. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114380>
- Wernberg, T., Thomsen, M.S., Baum, J.K., Bishop, M.J., Bruno, J.F., Coleman, M.A., Filbee-Dexter, K., *et al.* 2024. Impacts of climate change on marine foundation species. *Annual Review of Marine Science*, 16: 18.1–18.36. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-042023-093037>
- Xu, Q., Gao, F. y Yang, H. 2016. Importance of kelp-derived organic carbon to the scallop *Chlamys farreri* in an integrated multi-trophic aquaculture system. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 34(2): 322–329. <https://doi.org/10.1007/s00343-015-4332-2>
- Yong, W.T.L., Thien, V.Y., Rupert, R. y Rodrigues, K.F. 2022. Seaweed: A potential climate change solution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159: 112222. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112222>
- Young, C.S. y Gobler, C.J. 2018. The ability of macroalgae to mitigate the negative effects of ocean acidification on four species of North Atlantic bivalve. *Biogeosciences*, 15: 6167–6183. <https://doi.org/10.5194/bg-2018-115>
- Young, C.S., Sylvers, L.H., Tomasetti, S.J., Lundstrom, A., Schenone, C., Doall, M.H. y Gobler, C.J. 2022. Kelp (*Saccharina latissima*) Mitigates Coastal Ocean Acidification and Increases the Growth of North Atlantic Bivalves in Lab Experiments and on an Oyster Farm. *Frontiers in Marine Science*, 9: 881254. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.881254>
- Yu, L.Q.J., Mu, Y., Zhao, Z., Lam, V.W.Y. y Sumaila, U.R. 2017. Economic challenges to the generalization of integrated multi-trophic aquaculture: An empirical comparative study on kelp monoculture and kelp-mollusk polyculture in Weihai, China. *Aquaculture*, 471: 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.01.015>
- Yu, Z., Zhu, X., Jiang, Y., Luo, P. y Hu, C. 2014. Bioremediation and fodder potentials of two *Sargassum* spp. in coastal waters of Shenzhen, South China. *Marine Pollution Bulletin*, 85: 797–802. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.11.018>
- Zeng, X., Chen, X. y Zhuang, J. 2015. The positive relationship between ocean acidification and pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 91: 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.12.001>

Bioseguridad en la acuicultura de macroalgas chilenas: el caso de *Gracilaria chilensis*

Pedro Murúa

*Universidad Austral de Chile
Puerto Montt, Chile*

Murúa, P. 2025. *Bioseguridad en la acuicultura de macroalgas chilenas: el caso de Gracilaria chilensis*. En: Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Murúa Andrade, P. y Farías Molina, A. (coords.). Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 24-26 de junio de 2024, Puerto Varas, Chile. *FAO Actas de Pesca y Acuicultura*. N.º 74. Roma, FAO. pp. 195-203.

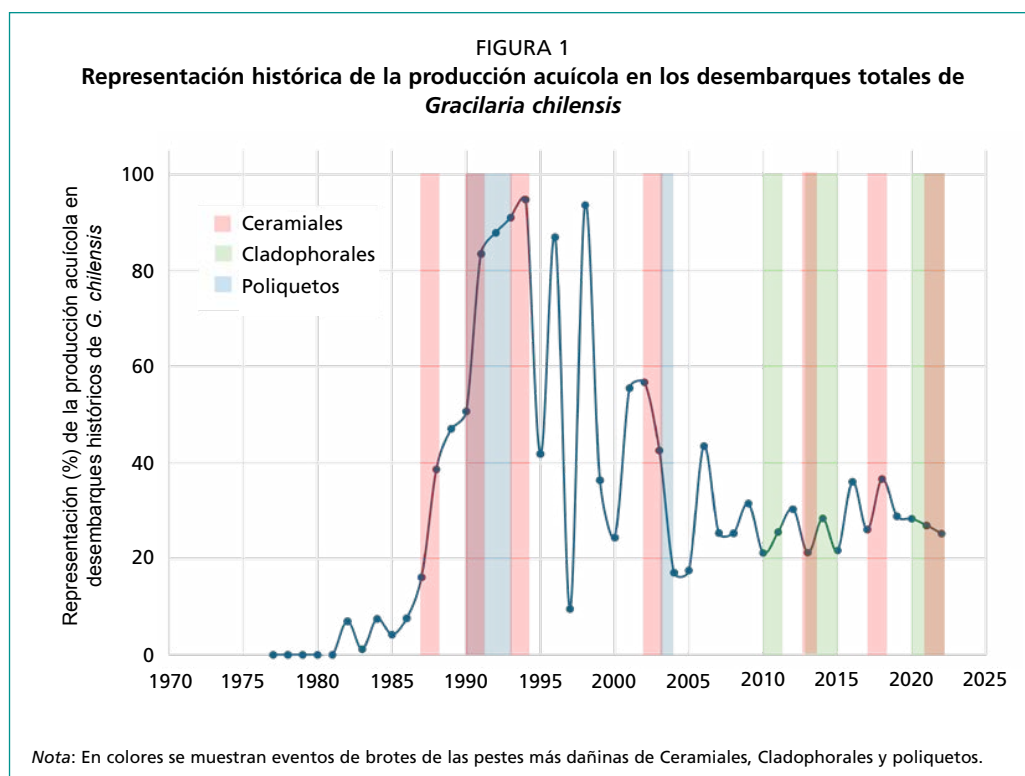
RESUMEN

Gracilaria chilensis (conocida como “pelillo”) es la macroalga que ha sido cultivada durante más tiempo y en mayores volúmenes en América Latina. Sin embargo, desde la masificación de su cultivo en Chile, ha presentado problemas sanitarios recurrentes asociados a pestes de algas Ceramiales, gusanos poliquetos y, más recientemente, mareas verdes Cladophorales. Este estudio de caso tiene como objetivo revisar los problemas sanitarios y de bioseguridad que históricamente ha enfrentado *G. chilensis*, y cómo estos se perpetúan en la actualidad, limitando su rentabilidad y crecimiento.

INTRODUCCIÓN

La producción de macroalgas crece a tasas sin precedentes. Según los últimos registros, se expande a un 8 % anual (Ferdouse *et al.*, 2018; Loureiro, Gachon y Rebours, 2015), alcanzando las 35 000 toneladas en 2020 (FAO, 2022). En países con acuicultura de macroalgas desarrollada, las enfermedades y pestes representan uno de sus mayores desafíos. Por ejemplo, en el cultivo de *Pyropia/Porphyra* en la República de Corea, las enfermedades crónicas virales y de pseudo hongos (como el tizón de *Olpidiopsis* y la *Pitiosis*) comprometen cerca del 30 % de la producción (Kim *et al.*, 2014). En el sudeste asiático, las algas *Euclidean* y *Kappaphycus* se enfrentan a enfermedades como el “ice-ice”, un síndrome bacteriano que genera decoloración y pudrición de los talos, y el “goosebumps”, causado por algas epífitas de los géneros *Polysiphonia* y *Neosiphonia* (Ward *et al.*, 2020). Es particularmente relevante que los patógenos causantes de estos brotes solo se hayan descrito formalmente en años recientes (Murúa *et al.*, 2023). Además, muchas de estas especies asiáticas se encuentran de forma natural en América Latina (Muñoz, Patiño y Murúa, 2024) o han llegado accidentalmente durante la introducción de macroalgas para cultivo (Brakel *et al.*, 2021).

América Latina es una región poco explorada en cuanto a enfermedades, pestes y otras amenazas biológicas para macroalgas (Murúa *et al.*, 2024). Asimismo, cuenta con un marco regulatorio incipiente para la detección, manejo y control de estas amenazas (Mendez *et al.*, 2024). Entre las macroalgas cultivadas, *Gracilaria chilensis* (también conocida como “pelillo”) destaca por tener la mayor trayectoria (desde los años 80) y los mayores volúmenes de producción. Sin embargo, paradójicamente, es la que menos



crece: su producción se mantiene entre 40 000 y 80 000 toneladas anuales, con una participación acuícola formalmente reportada de solo el 30 % de la producción total en Chile (Figura 1). Este estancamiento se debe a diversos factores limitantes, incluyendo la falta de mecanismos activos de bioseguridad en las granjas de cultivo, los cuales son fundamentales para el desarrollo de sistemas productivos. En este estudio analizamos el caso de *G. chilensis* y su relación con los desafíos en bioseguridad identificados durante sus aproximadamente 45 años de historia.

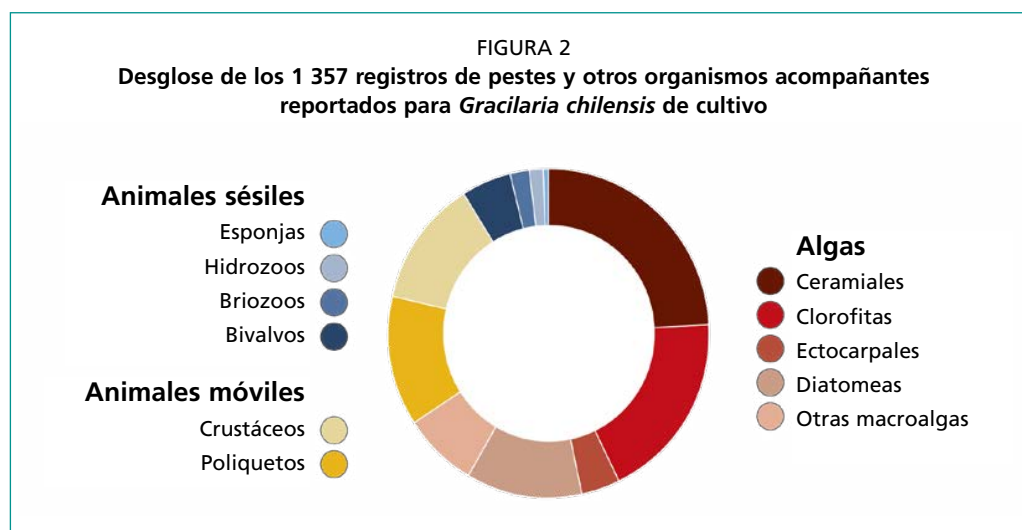
PESTES Y ENFERMEDADES DEL PELILLO

La acuicultura del pelillo se ha enfrentado a diversos problemas de riesgos biológicos. Los más relevantes son los brotes de plagas que proliferan junto con las existencias de cultivo. Aunque no se clasifican como enfermedades, estas pueden afectar significativamente la rentabilidad de la producción. En el caso de *Gracilaria*, el pelillo afectado presenta un crecimiento más lento, se descompone más rápidamente y puede generar menores rendimientos de sus subproductos, como el agar. Cuando la cosecha presenta plagas, el precio puede reducirse hasta un 50 %, o incluso rechazarse la compra si el nivel de contaminación supera el 30 % de carga epífita.

Desde la década de 1980, se han identificado tres tipos principales de plagas en cultivos de *G. chilensis*, causados por i) plagas de gusanos herbívoros, ii) algas epífitas (como Ceramiales) y iii) mareas verdes (Cladophorales) (Figura 1). Además, existen registros esporádicos de organismos acompañantes como invertebrados sésiles y móviles, otras macroalgas epífitas (Figura 2) y, en menor medida, patógenos.

a) Gusanos poliquetos

A principios de la década de 1990, se detectaron explosiones epidémicas de anélidos poliquetos en cultivos de *G. chilensis* en el sur de Chile (Seno de Reloncaví). La herbivoría de estos organismos causó la destrucción y malformación del pelillo (Jara *et al.*, 1993). Los responsables fueron estadios juveniles recién asentados de *Platynereis* y *Perinereis*, que colonizaron súbitamente las macroalgas de cultivo en un período



de dos meses, alcanzando cantidades exorbitantes de hasta 1 650 individuos m⁻², con una incidencia del 100 % (Jara, 1990). Las macroalgas afectadas sufrieron cambios morfológicos drásticos: los talos sanos con ramificaciones secundarias y terciarias se transforman en talos engrosados con un solo eje central sin ramificaciones. Los casos más severos resultaron en la pérdida total de los cultivos.

Aunque no se han registrado brotes de igual magnitud desde entonces, se siguen reportando brotes de poliquetos en zonas de cultivo del sur de Chile cada década aproximadamente (Candia *et al.*, 2006; García-Medina, 2006). Es notable que en aproximadamente el 50 % de estos reportes no se haya identificado la especie de poliqueto causante del brote.

b) Algas epífitas

Un alga epífita es aquella que crece sobre otra alga (también llamada huésped o basífita). A diferencia de los parásitos, no toman nutrientes del alga huésped, sino que la utilizan únicamente como estructura de soporte físico. Si bien esta relación tiende a ser comensalista, cuando las epífitas proliferan en cantidades descontroladas pueden competir por nutrientes, gases disueltos y luz solar (efecto de sombreado), lo que reduce el crecimiento de *Gracilaria* (Fletcher, 1995). Frecuentemente, desarrollan mecanismos de adhesión sofisticados que involucran la penetración de estructuras rizoidales en las capas corticales y medulares del huésped, causando lesiones (Leonardi *et al.*, 2006), infecciones secundarias o activación de mecanismos de defensa (Lion *et al.*, 2006).

Los problemas de epifitismo han sido los más documentados en cultivos de *G. chilensis*, con apariciones continuas desde finales de los años 80, cuando la producción de *Gracilaria* mediante cultivo comenzaba su expansión (Figura 1). Hasta la fecha se han descrito más de 860 brotes de algas epífitas en cultivos, concentrándose el 75 % en dos áreas del sur de Chile: Maullín y Ancud (Murúa, sin publicar), zonas de importancia histórica para el cultivo de pelillo. Estas cifras probablemente estén subestimadas, ya que provienen principalmente de proyectos universitarios y de centros de investigación con financiamiento público, existiendo años y zonas sin vigilancia formal.

Entre las epífitas más comunes, las diatomeas han causado menos problemas para la industria debido a su fácil remoción e interacción superficial débil (infección tipo 1 según Leonardi *et al.*, 2006), permitiendo su eliminación manual o con chorros de agua dulce a presión. Solo un pequeño grupo de diatomeas, las que forman filamentos, pueden acumularse en cantidades considerables sobre *G. chilensis* (p. ej., *Melosira* spp.; Candia *et al.*, 2006). En esos casos, pueden formar un barro que cubre al basífita e inhibe su crecimiento (Avila *et al.*, 2019).

Las algas epífitas pardas comprenden principalmente especies del orden Ectocarpales, siendo *Hinckesia* (ex *Giffordia*) y *Ectocarpus* spp. las más frecuentes (Kuschel y Buschmann, 1991; Usandizaga *et al.*, 2020). Al igual que diatomeas, producen una infestación tipo I (Leonardi *et al.*, 2006) y presentan baja prevalencia en ambientes estuarinos, donde más se cultiva el pelillo. Por estas razones, no han representado un problema significativo para la acuicultura de *Gracilaria*.

Algas rojas Ceramiales son las epífitas más comunes de *G. chilensis* y representan la mayor carga epífita en granjas (superando el 200 % del peso del pelillo, sin publicar). Conocidas como la “flor del pelillo”, están compuestas por algas Ceramiales de los géneros *Ceramium*, *Polysiphonia*, *Callithamnion* y *Antithamnion*, y en menor medida, algas *Achrochaetium* y *Erythrocladia* (Avila *et al.*, 2019; Kuschel y Buschmann, 1991). Su impacto en los tejidos oscila desde infección tipo I a tipo V, provocando lesiones del talo al nivel cortical y medular (Leonardi *et al.*, 2006). Por esta razón, son difíciles de eliminar del pelillo.

c) Mareas verdes

Las mareas verdes son fenómenos ecológicos caracterizados por la repentina y rápida proliferación de macroalgas verdes. Cuando las condiciones son favorables (mayor luz solar, temperaturas cálidas o aumento de nutrientes), estas macroalgas experimentan un crecimiento explosivo, formando densos parches en la columna del agua. Las macroalgas verdes foliares (*Ulva* spp.) y filamentosas (*Rhizoclonium*, *Cladophora*, *Chaetomorpha* spp.) han sido sistemáticamente reportadas como flora acompañante de *Gracilaria* de cultivo, ya sea como epífitas o enredadas en ellas (Avila, 2019). Sin embargo, en los últimos 15 años se han observado proliferaciones masivas recurrentes de estas macroalgas Cladophorales (Leal *et al.*, 2020). El primer caso documentado ocurrió en el año 2000 con la desembocadura del río Pudeto, repitiéndose 10 años después en el río Maullín (Stange, 2024). Desde entonces, las mareas verdes se han vuelto un fenómeno casi anual de variable intensidad. Durante los veranos de 2013 y 2015, se registraron tres brotes del alga *Rhizoclonium* sp. en la ribera norte del río Maullín (Olmos y Nuñez, 2014). Tras una disminución de florecimientos entre 2017 y 2019, en 2020 ocurrió otra gran proliferación, esta vez de *Chaetomorpha* sp. Es importante señalar que todos estos registros están íntimamente asociados con cultivos de *G. chilensis* (Figura 1).

En términos productivos, estas floraciones causan pérdidas de hasta un 90 % para los cultivadores (Avila, 2019). Si bien estas macroalgas no suelen causar enfermedades en sus huéspedes, reducen la productividad por competencia y encarecen la producción de subproductos (p. ej., por costos de desmalezamiento, disminución del rendimiento final y contaminación). También alteran las características físicas y biológicas del ambiente acuático, modificando los niveles de oxígeno y dióxido de carbono. Además, la descomposición de su biomasa genera cambios en la calidad del agua y aire, representando un potencial problema de salud pública para las comunidades aledañas.

En consecuencia, la agencia chilena SUBPESCA, en el marco del artículo 4° del Reglamento sobre Plagas Hidrobiológicas, declaró áreas de plaga los cuerpos de agua en la ribera norte del río Maullín y San Pedro de Nolasco (Comuna de Maullín) y río Pudeto (Comuna de Ancud, Chiloé), debido a estas macroalgas denominadas “tipo-*Rhizoclonium*”. Esta declaración ha sido extendida en dos ocasiones, dado que el problema persiste en estos sectores hasta la fecha.

d) Otros epibiontes

Se han descrito numerosas algas foliares que pueden crecer sobre *G. chilensis*, ya sea de como epífitas o enredadas en ellas. Entre estas se encuentran *Callophyllis*, *Macrocystis* o *Desmarestia*. Estas algas no representan un problema para el cultivo debido a sus bajas cantidades y facilidad de remoción (Avila *et al.*, 2019; Candia *et al.*, 2006). Sin embargo, su potencial papel como vectores de pestes y enfermedades aún no ha sido evaluado.

En cuanto a la fauna asociada, se han registrado crustáceos anfípodos e isópodos pertenecientes a 13 familias distintas (García-Medina, 2006). Si bien son organismos comunes, se desconoce su función como vectores de pestes y si su presencia es beneficiosa (control de epifitas) o perjudicial (consumo o daño del pelillo) para los cultivos.

Por último, los invertebrados sésiles pueden afectar a la *G. chilensis* cultivada. Los bivalvos mitílidos utilizan los cultivos como sustrato de reclutamiento, adhiriéndose firmemente con su biso a los ejemplares. Además, organismos como cirrípedos, hidrozoos y briozoos pueden cubrir gran parte del talo de *G. chilensis* en algunas estaciones del año como primavera y verano (Candia *et al.*, 2006). Estos reclutamientos hacen que las líneas de cultivo sean más pesadas, incrementando el riesgo de hundimiento, corte de líneas, desprendimiento o enterramiento de algas. Estos registros son menos frecuentes que el epifitismo algal, la erradicación de estos organismos resulta particularmente difícil una vez asentados.

e) Patógenos de *Gracilaria chilensis*

A pesar de la intensidad del cultivo, no se han detectado enfermedades considerables en el pelillo cultivado. En la zona del Pudeto se han identificado amebas *Tubulinea* que infectan el pelillo, fagocitando células subcorticales y macroscópicamente causan blanqueamiento, descomposición y sobre-fragmentación de los talos (Correa y Flores, 1995). También se ha detectado recientemente el alga parda endófito *Microspongium tenuissimum* (Chordariaceae), que al colonizar hasta la médula de *G. chilensis* provoca endurecimiento, talos quebradizos y engrosamiento de la zona afectada (Murúa, sin publicar). Sin embargo, ambos casos son aislados y no representan un impacto significativo para los cultivos.

BIOSEGURIDAD DE LA ACUICULTURA DE MACROALGAS

El concepto de bioseguridad surgió originalmente en relación con el manejo de armamento biológico y bioterrorismo (Renault, Humblet y Saegerman, 2021). Actualmente, se define como un conjunto de medidas sanitarias destinadas a proteger: i) los sistemas de producción, ii) salud humana o la confianza del consumidor, y iii) el ambiente y la producción sostenible (FAO, 2007). En el campo de la acuicultura, la mayoría de las medidas de bioseguridad se han desarrollado o implementado para animales marinos, principalmente debido a sus grandes volúmenes de producción, que han ocasionado importantes crisis sanitarias con pérdidas anuales de 6 billones de USD (Stentiford *et al.*, 2017). Por su parte, la acuicultura de macroalgas se caracteriza por volúmenes más reducidos y una producción de materias primas de menor valor, siendo desarrollada principalmente por cultivadores de países de ingresos bajos a medios (Cottier-Cook *et al.*, 2022). Al ser considerada una actividad con bajo impacto ambiental, está sujeta a regulaciones menos estrictas que la acuicultura animal, lo que puede generar vulnerabilidades en la bioseguridad (Mendez *et al.*, 2024).

Amenazas a la bioseguridad en la acuicultura de *Gracilaria chilensis*

Solo en la última década, *G. chilensis* ha sido objeto de regulaciones específicas para el control de amenazas biológicas (mareas verdes). Su cultivo está amparado por la Ley General de Pesca y Acuicultura y la Ley de Medio Ambiente, junto con sus decretos y normas asociadas. Mendez *et al.*, (2024) estimaron que, considerando todas las normativas vigentes que regulan al cultivo, únicamente algunos riesgos de bioseguridad están abordados (especialmente la protección a la biodiversidad), mientras que otros muchos permanecen sin regular (por ejemplo, la hibridación entre *stocks* de cultivo y naturales). Los autores concluyen que son escasas las normativas que detallan específicamente cómo se prevendrían, mitigarían o erradicarían estos riesgos. Esto significa que existen pocas medidas activas en la acuicultura de macroalgas

para gestionar estas amenazas. No obstante, su mención en leyes generales permitiría incorporar nuevos decretos cuando sea necesario. En el caso específico del pelillo, los riesgos históricos y actuales en cultivos se resumen en la Figura 3.

A continuación, se describen los cinco riesgos de bioseguridad presentes en una granja genérica de *G. chilensis* (Figura 3):

1. Interacciones ecológicas: hasta el momento se han identificado los agentes bióticos (algas Ceramiales y Cladophorales, brotes poliquetos) que regulan la productividad del pelillo. Sin embargo, se desconocen los factores bióticos (por ejemplo, biocontroladores) y abióticos que regulan estas pestes, los cuales podrían ser manejados en una granja. Asimismo, no se han identificado qué organismos naturales pueden estar actuando como vectores de pestes y enfermedades.

Recientemente, gracias al uso de técnicas de biología molecular, se han revisado especies en base a su genética, usando códigos de barras de ADN. En el caso de pestes del pelillo, se ha revelado que solo el 30 % de los registros están caracterizados a nivel de especie. Además, solo en los últimos años se están desarrollando germoplasmas de pestes que permitan entender su reproducción, ciclo de vida, mecanismos de infestación y tipo de interacción con *G. chilensis*.

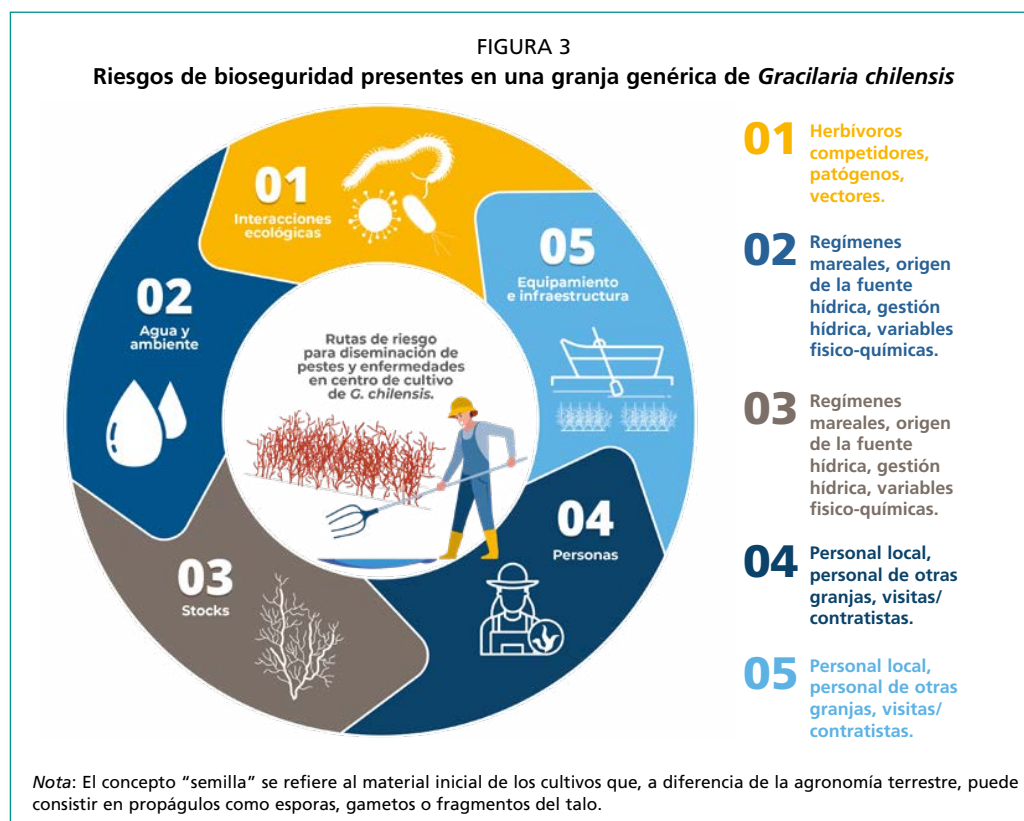
2. Agua y ambiente: el pelillo se cultiva en hábitats intermareales y submareales, así como en ambientes estuarinos, siendo tolerante a un amplio rango de salinidad, temperatura, exposición a la desecación y tipo de sustrato. Esta adaptabilidad podría explicar por qué los riesgos de pestes y enfermedades son menos diversos o comunes en comparación con otros recursos acuícolas. No obstante, esta misma característica implica que las amenazas biológicas existentes pueden ser transportadas tanto desde río arriba como desde el océano.

Existen riesgos adicionales provocados por actividades que comparten el agua. Por ejemplo, los Residuos Industriales Líquidos (RILES), o aguas de desecho resultantes del proceso, actividad o los servicios de las industrias, pueden contener altas concentraciones de elementos contaminantes que afecten a su composición y calidad del agua, creando condiciones favorables a la proliferación de algas oportunistas. Por ello, la gestión de cuencas es fundamental cuando existen múltiples usuarios, requiriendo un ordenamiento territorial que permita el desarrollo sostenible y equilibrado de todas las actividades, incluida la acuicultura.

3. Existencias: los cultivos del pelillo utilizan fragmentos de talo como semillas, los cuales son provistos por empresas compradoras del pelillo, universidades y otras instituciones, o extraídos de sus propios cultivos de años anteriores. No existe un registro de trazabilidad de este material ni períodos de cuarentena que permitan detectar brotes de manera temprana. Además, no hay control ni trazabilidad del origen geográfico de estas semillas.

Los germoplasmas de algas pelillo son escasos en Chile y presentan heterogeneidad genética, por lo que no proveen semillas al sector productivo de forma recurrente. No existe un programa genético que permita desarrollar variedades mejoradas con atributos de interés (como la resistencia a pestes). Tampoco hay un germoplasma estatal, como existe en la mayoría de los recursos agronómicos chilenos, que permita la protección de estas macroalgas.

Otro aspecto crítico es la ausencia de planes de contingencia para el proceso de “engorde” y cosecha. No existen planes de mitigación para casos de desprendimiento o embancamiento masivos. No hay protocolos para el manejo de “mortalidades”, algas contaminadas con epífitos o pestes, que han perdido su valor comercial. Tampoco hay estrategias para gestionar las interacciones entre ejemplares de *Gracilaria* cultivados y praderas naturales que crecen de manera contigua. Esta



proximidad aumenta el riesgo de hibridación y facilita la interacción prolongada de flora, fauna y microbioma. Además, incrementa la posibilidad de invasiones, especialmente considerando la eficiencia reproductiva de *Gracilaria*.

4. **Personas:** No existen protocolos vigentes que regulen las condiciones de ingreso y tránsito del personal en granjas de cultivo. Tampoco hay regulaciones para el tránsito de personas externas, como personal de otras granjas o visitantes (por ejemplo, fiscalizadores).
5. **Equipamiento e infraestructura:** no existen normativas que regulen el manejo de utensilios e infraestructura en granjas, salvo recomendaciones de buenas prácticas. Generalmente los utensilios de siembra y cosecha, así como la infraestructura de soporte, no se desinfectan durante o después de cada faena. Tampoco se establecen períodos de descanso en las concesiones. Las estructuras para siembra y anclaje (fondeos, líneas madres, estacones) permanecen indefinidamente en los centros sin vigilancia ni mantenimiento, frecuentemente con algas de cultivo remanentes. En cultivos en el mar, el tráfico de embarcaciones menores carece de control, lo que aumenta el riesgo de transmisión y propagación de agentes patógenos y pestes.

CONCLUSIONES

Gracilaria chilensis es un alga cultivada en Chile desde la década de 1980, que ha enfrentado repetidamente brotes de pestes. Estas pueden competir con el pelillo (algas epifitas y mareas verdes) o consumirlo (poliquetos), causando desde afectaciones a la salud o al bienestar a pérdidas productivas y de competitividad. Los brotes son frecuentes, crónicos y, últimamente, devastadores, llegando a causar pérdidas totales o cubrir grandes áreas. Sus registros han sido principalmente académicos, con programas de vigilancia estatal solo en años recientes. Además, la mayoría de las especies asociadas a estas pestes carecen de una clasificación taxonómica y filogenética, lo que impide conocer la diversidad real de estos organismos.

El Estado de Chile ha mostrado un rol regulador tardío en la prevención de estos problemas. Como resultado, las granjas generalmente carecen de planes de bioseguridad vigentes y las medidas implementadas son variables y voluntarias. Los centros de cultivo del pelillo en Chile enfrentan diversos riesgos: algunos son problemas ecosistémicos que requieren la acción coordinada del Estado, cultivadores y académicos, mientras que otros podrían controlarse mediante un manejo prudente, aunque requieren una inversión que debe evaluarse.

REFERENCIAS

- Avila, M., Aroca, G., Riquelme, R., de Zarate, C. y Rodríguez, D. 2019. *Problemas actuales y desafíos en el cultivo del pelillo en la Región de Los Lagos*. Version diferente, 39: 58–61.
- Avila, M. 2019. *Determinación de factores ecosistémicos que favorecen el aumento de Rhizoclonium spp., y desarrollo de un programa de monitoreo y control de esta especie plaga en la Región de Los Lagos*. Informe final FIPA N° 2017-10. Puerto Montt, Universidad Arturo Prat. <https://www.subpesca.cl/fipa/613/w3-article-96203.html>
- Brakel, J., Sibonga, R.C., Dumilag, R.V., Montalescot, V., Campbell, I., Cottier-Cook, E.J., Ward, G., et al. 2021. Exploring, harnessing and conserving marine genetic resources towards a sustainable seaweed aquaculture. *Plants, people, planet*, 3(4): 337–349. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10190>
- Candia, A., Nuñez, M., Galleguillos, F., Aroca, G. y Israel, A. 2006. *Mejoramiento productivo del cultivo de pelillo Gracilaria chilensis*. Proyecto DFI_CORFO 01CR3PT-13. Puerto Montt, Instituto de Fomento Pesquero.
- Correa, J.A. y Flores, V. 1995. Whitening, thallus decay and fragmentation in *Gracilaria chilensis* associated with an endophytic amoeba. *Journal of Applied Phycology*, 7(4): 421–425. <https://doi.org/10.1007/BF00003800>
- Cottier-Cook, E.J., Cabarubias, J.P., Brakel, J., Brodie, J., Buschmann, A.H., Campbell, I., Critchley, A.T., et al. 2022. A new Progressive Management Pathway for improving seaweed biosecurity. *Nature Communications*, 13(1): 7401. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34783-8>
- FAO. 2007. *FAO Biosecurity Toolkit*. <https://www.fao.org/4/a1140e/a1140e00.htm>
- FAO. 2022. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022. Hacia la transformación azul*. Roma, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0461es>
- Ferdouse, F., Holdt, S.L., Smith, R., Murúa, P. y Yang, Z. 2018. The global status of seaweed production, trade and utilization. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fletcher, R.L. 1995. Epiphytism and fouling in *Gracilaria* cultivation: an overview. *Journal of Applied Phycology*, 7(3): 325–333. <https://doi.org/10.1007/BF00004006>
- García-Medina, R. 2006. *Variación estacional de la macroinfauna en el río Cariquilda, Estuario Maullin, y su relación con la biomasa de Gracilaria chilensis Bird, McLachlan y Oliveira*. Aquaculture Engineering. Thesis. Puerto Montt, Universidad Austral de Chile. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2007/fch713v/doc/fch713v.pdf>
- Jara, F., Céspedes, R., Rozbaczylo, N., Bertrán, C., Neira, P. y Rivera, P. 1993. *Investigación efecto epidemia de gusanos de mar sobre cultivos de algas Gracilarias, Puerto Montt*. Informe final Proyecto FNDR 1993. FNDR. Puerto Montt, Universidad Austral de Chile.
- Jara, F. 1990. Epidemic outbreaks of herbivorous annelid worms (Polychaeta: Nereididae) in the south of Chile. *Medio Ambiente*, 11(1): 65–75.
- Kim, G.H., Moon, K.-H., Kim, J.-Y., Shim, J. y Klochkova, T.A. 2014. A reevaluation of algal diseases in Korean *Pyropia* (*Porphyra*) sea farms and their economic impact. *ALGAE*, 29(4): 249–265. <https://doi.org/10.4490/algae.2014.29.4.249>

- Kuschel, F.A. y Buschmann, A.H. 1991. Abundance, effects and management of epiphytism in intertidal cultures of *Gracilaria* (Rhodophyta) in southern Chile. *Aquaculture*, 92: 7–19. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(91\)90004-Q](https://doi.org/10.1016/0044-8486(91)90004-Q)
- Leal, P.P., Ojeda, J., Sotomayor, C. y Buschmann, A.H. 2020. Physiological stress modulates epiphyte (*Rhizoclonium* sp.)-basiphyte (*Agarophyton chilense*) interaction in co-culture under different light regimes. *Journal of Applied Phycology*, 32(5): 3219–3232. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02153-w>
- Leonardi, P.I., Miravalles, A.B., Faugeton, S., Flores, V., Beltrán, J. y Correa, J.A. 2006. Diversity, phenomenology and epidemiology of epiphytism in farmed *Gracilaria chilensis* (Rhodophyta) in northern Chile. *European Journal of Phycology*, 41(2): 247–257. <https://doi.org/10.1080/09670260600645659>
- Lion, U., Wiesemeier, T., Weinberger, F., Beltrán, J., Flores, V., Faugeton, S., Correa, J. y Pohnert, G. 2006. Phospholipases and Galactolipases Trigger Oxylinin-Mediated Wound-Activated Defence in the Red Alga *Gracilaria chilensis* against Epiphytes. *ChemBioChem*, 7(3): 457–462. <https://doi.org/10.1002/cbic.200500365>
- Loureiro, R., Gachon, C.M.M. y Rebours, C. 2015. Seaweed cultivation: potential and challenges of crop domestication at an unprecedented pace. *New Phytologist*, 206(2): 489–492. <https://doi.org/10.1111/nph.13278>
- Mendez, C., Bustamante, D.E., Calderon, M.S., Gauna, C., Hayashi, L., Robledo, D., Tapia-Larios, C., et al. 2024. Biosecurity baseline for a sustainable development of seaweed aquaculture in Latin America. *Marine Policy*, 159: 105933. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105933>
- Muñoz, L., Patiño, D.J. y Murúa, P. 2024. Natural biocontrol of a *Porphyra* sp. pest on farmed *Gracilaria chilensis* by a pythiosis outbreak. *Journal of Applied Phycology*. <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03228-8>
- Murúa, P., Garvetto, A., Egan, S. y Gachon, C.M.M. 2023. The Reemergence of Phycopathology: When Algal Biology Meets Ecology and Biosecurity. *Annual Review of Phycopathology*, 61(1): 231–255. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-120425>
- Murúa, P., Muñoz, L., Bustamante, D.E., Gauna, C., Hayashi, L., Robledo, D., Strittmatter, et al. 2024. The first phycopathological atlas in Latin America unveils the underdocumentation of algal pathogens. *Algal Research*, 82: 103604. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103604>
- Olmos, P. y Nuñez, M. 2014. *Caracterización sanitaria de los cultivos de macroalgas y evaluación de alternativas de control de los principales agentes patógenos*. Informe final SUBPESCA. Informe final. Subpesca.
- Renault, V., Humblet, M.-F. y Saegerman, C. 2021. Biosecurity Concept: Origins, Evolution and Perspectives. *Animals*, 12(1): 63. <https://doi.org/10.3390/ani12010063>
- Stange, C. 2024. *Determinación de variables de luminosidad y temperatura para la proliferación de mareas verdes Cladophorales, asociadas a cultivos de pelillo (*Gracilaria chilensis*)*. Puerto Montt, Universidad Austral de Chile. Tesis de Ingeniería ambiental.
- Stentiford, G.D., Sritunyalucksana, K., Flegel, T.W., Williams, B.A.P., Withyachumnarnkul, B., Itsathitphaisarn, O. y Bass, D. 2017. New Paradigms to Help Solve the Global Aquaculture Disease Crisis. *PLOS Pathogens*, 13(2): e1006160. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1006160>
- Usandizaga, S., Buschmann, A.H., Camus, C., Kappes, J.L., Arnaud-Haond, S., Mauger, S., Valero, M. y Guillemin, M.L. 2020. Better off alone? Compared performance of monoclonal and polyclonal stands of a cultivated red alga growth. *Evolutionary Applications*, 13(5): 905–917. <https://doi.org/10.1111/eva.12908>
- Ward, G.M., Faisan, J.P., Cottier-Cook, E.J., Gachon, C., Hurtado, A.Q., Lim, P.E., Matoju, I., et al. 2020. A review of reported seaweed diseases and pests in aquaculture in Asia. *Journal of the World Aquaculture Society*, 51(4): 815–828. <https://doi.org/10.1111/jwas.12649>

Acuicultura de macroalgas en el Perú

Paul M. Baltazar Guerrero, Max Castañeda-Franco y Arturo Mires-Reyes

Universidad Científica del Sur

Lima, Perú

Baltazar Guerrero, P.M., Castañeda-Franco, M. y Mires-Reyes, A. 2025. *Acuicultura de macroalgas en el Perú*. En: Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Murúa Andrade, P. y Farías Molina, A. (coords.). Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 24-26 de junio de 2024, Puerto Varas, Chile. *FAO Actas de Pesca y Acuicultura*. N.º 74. Roma, FAO. pp. 205-219.

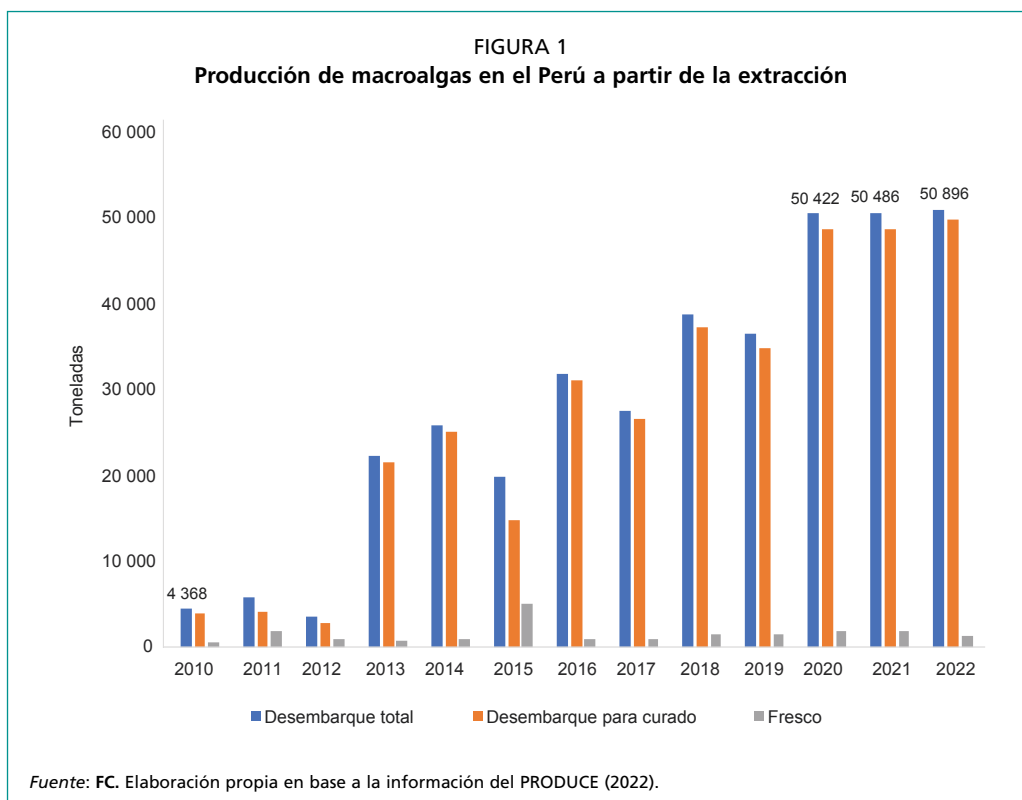
RESUMEN

El cultivo de macroalgas en el Perú se lleva a cabo de manera experimental desde hace algunos años. Sin embargo, el aumento de la demanda y la reducción de las praderas naturales han impulsado el desarrollo de técnicas de cultivo a gran escala. Este documento expone los avances en la producción de biomasa de cuatro especies comerciales a lo largo de la costa peruana. En el caso de *Chondracanthus chamissoi*, la producción mediante esporas alcanza entre 820 y 1 020 g de macroalga por metro lineal (m) tras 90 días, con un promedio de 45 ± 9 microtalos asentados en cuerdas de *hatchery*. En comparación, el cultivo vegetativo genera una menor biomasa (650 ± 80 g/m) en solo 45 días. Por su parte, *Gracilariopsis lemaneiformis* también se cultiva de forma vegetativa en el mar, alcanzando $1\ 250 \pm 120$ g/m en un período similar. *Mazzaella canaliculata*, una macroalga roja de reciente interés, supera los 3,0 mm tras 90 días de esporocultivo. Además, *Macrocystis pyrifera* ha mostrado resultados prometedores, con hasta 250 plántulas de 35 mm en 60 días en envases de 1,5 L. Actualmente, se está evaluando su siembra y crecimiento. El cultivo de macroalgas en el Perú tiene buenas perspectivas de desarrollo debido a la creciente demanda de productos con valor añadido.

INTRODUCCIÓN

La producción de macroalgas representa el 30 % de la acuicultura mundial, y el 97 % de las macroalgas obtenidas proviene de la acuicultura, mientras que solo el 3 % procede de la extracción. Los principales países productores son China (58 %), Indonesia (27 %) y la República de Corea (5 %). En la última década, la producción de macroalgas se ha triplicado, pasando de 10 596 a 36 000 millones de toneladas, con un valor estimado de 16 500 millones de USD distribuidos en 31 especies (FAO, 2022).

Hasta 2016, la producción de macroalgas en América Latina alcanzó las 373 000 toneladas, procediendo en su mayoría de la extracción de praderas naturales (97 %) (Alemañ, Robledo y Hayashi, 2019) lo que ha ejercido una fuerte presión extractiva sobre 10 especies. Una situación similar se observa en el Perú, donde se ha documentado una reducción de la biomasa en los bancos naturales de *Gracilariopsis lemaneiformis*, *Chondracanthus chamissoi*, *Mazzaella canaliculata*, *Macrocystis pyrifera* y *Lessonia berteroa* (Flores *et al.*, 2015; Ávila-Peltroche y Padilla-Vallejos, 2020; Uribe *et al.*, 2020; IMARPE, 2022). Esta tendencia queda reflejada en los datos del Ministerio de la Producción del Perú (PRODUCE), que indican que en los últimos 12 años la extracción de macroalgas se ha triplicado. En 2010, el total reportado fue de 4 368 toneladas, mientras que en 2022 ascendió a 50 826 toneladas. De esta producción,



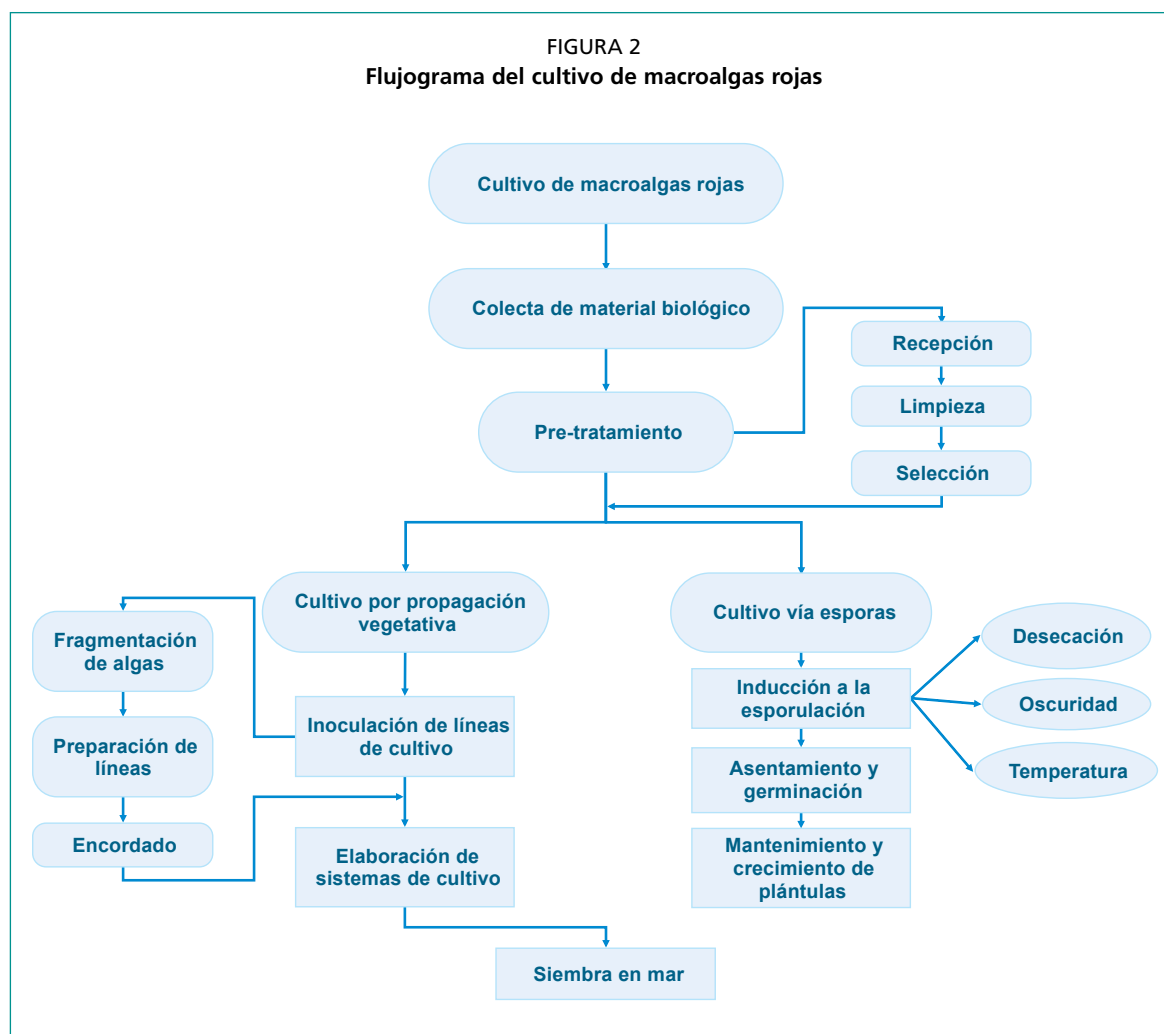
el 97 % se exporta en estado seco y solo el 3 % se consume a nivel interno en estado fresco (PRODUCE, 2022) (Figura 1).

El cultivo de macroalgas en el Perú se remonta a la década de 1990, cuando el Centro Peruano de Estudios para el Desarrollo Marino (ECODEMAR), el Instituto del Mar del Perú (IMARPE) y el Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero (FONDEPES) iniciaron algunas experiencias de cultivo con *Gracilariopsis lemaneiformis* (Baltazar y Gonzales, 1993; Cisneros, Bautista y Santos, 1997; Castillo, Espinoza y Valdivieso, 1999). Más adelante, en la primera década de los años 2000, empresas privadas y algunas universidades llevaron a cabo estudios y ensayos de cultivo con *C. chamissoi*, realizando los primeros pilotos de siembra en 2014.

Por lo expuesto anteriormente y ante el constante aumento de la demanda, el cultivo de macroalgas se presenta como la principal solución frente a la reducción de praderas naturales y el desabastecimiento de biomasa algal de las especies de interés comercial. Por ello, desde 2018, la Universidad Científica del Sur (Perú), en colaboración con empresas privadas y comunidades algeras artesanales, ha desarrollado biotecnologías de cultivo para especies de macroalgas rojas como *Chondracanthus chamissoi* (Huaman-Fernández *et al.*, 2024; Ruiz-Ipanaque *et al.*, 2024; Arbaiza *et al.*, 2023), *G. lemaneiformis* y *M. canaliculata*. Asimismo, se han llevado a cabo repoblaciones de *M. pyrifera*. Las investigaciones realizadas incluyen la producción de plántulas tanto a partir de esporas como mediante propagación vegetativa.

CULTIVO DE ALGAS ROJAS DE IMPORTANCIA COMERCIAL EN EL PERÚ

Las especies de macroalgas rojas de importancia comercial en el Perú pueden presentar una distribución amplia o localizada, por lo que el desarrollo, adaptación e implementación de técnicas de cultivo se ajusta generalmente a las condiciones específicas de cada zona de producción. Las técnicas de cultivo de macroalgas rojas se agrupan en dos categorías principales: cultivo a partir de esporas y cultivo vegetativo (Figura 2). Algunas especies, como *C. chamissoi* o *G. lemaneiformis*, han sido ampliamente estudiadas, lo que ha permitido desarrollar y probar ambas técnicas



en condiciones reales de cultivo. Por otro lado, especies de interés más reciente, como *M. canaliculata*, aún se encuentran en fase de investigación, con el objetivo de establecer protocolos eficaces para su propagación masiva en ambientes controlados.

Colecta de material biológico

La colecta de las frondas de *C. chamissoi*, *G. lemaneiformis* o *M. canaliculata* se lleva a cabo en puntos específicos donde existen praderas naturales o parches de estas especies, ubicados en los distritos de Paracas y San Andrés, en la provincia de Pisco, Ica. Según la profundidad a la que se encuentren las macroalgas, la recolección puede realizarse desde la orilla, mediante *snorkeling* si la profundidad es inferior a 1,5 m, o utilizando buceo autónomo o semiautónomo en zonas donde las praderas o parches se sitúan a más de 3 m de profundidad. En todos los casos se utiliza la técnica de arrancado manual (Acleto, 1986). Durante la recolección, el personal especializado se encarga de diferenciar las fases del ciclo de vida de cada especie y separarlas según el método de cultivo previsto (esporocultivo o propagación vegetativa). En algunos casos, la biomasa se recolecta en conjunto para su posterior separación en el laboratorio.

Pretratamiento

Una vez colectadas las frondas de *C. chamissoi*, *G. lemaneiformis* o *M. canaliculata*, estas se depositan en redes de colecta o “capachos” y se transportan en contenedores térmicos (*coolers*) con paquetes de hielo (*gel-packs*), manteniéndolas a una temperatura de entre 5 y 10 °C para prevenir el deterioro o el estrés de las macroalgas durante su

traslado al laboratorio. Al llegar, se llevan a cabo los procedimientos de recepción, limpieza y selección.

Recepción: La recepción de las macroalgas se realiza en el laboratorio inmediatamente después de su llegada desde el campo, garantizando la frescura y calidad del material recolectado. En esta fase, se completa un registro en el que se consignan datos clave como la especie recolectada, la identidad del recolector, la fecha y hora de la colecta, la ubicación geográfica exacta y la biomasa total recolectada. Esta información es fundamental para el control de calidad y trazabilidad del material, lo que permite una mejor gestión de las macroalgas durante las siguientes etapas del proceso. En algunos casos, si las macroalgas provienen de zonas con condiciones ambientales particulares o han estado expuestas a posibles contaminantes, se realiza una inspección visual preliminar para descartar organismos en mal estado o material que presente signos de deterioro.

Limpieza: Una vez recepcionadas las macroalgas, se procede a la eliminación de impurezas y organismos no deseados mediante un proceso de limpieza en varias fases. Inicialmente, las frondas se frotan suavemente sobre marcos de madera recubiertos con malla anchovetera, lo que permite desprender gran parte del sedimento y de los organismos epibiontes, como pequeños invertebrados (crustáceos, moluscos y equinodermos juveniles), así como macroalgas no objetivo que hayan quedado adheridas durante la recolección.

Posteriormente, las frondas pasan a una batería de recipientes con agua, donde se someten a un proceso de lavado en dos etapas. En la primera, se sumergen en un recipiente con agua dulce, lo que genera un *shock* osmótico que ayuda a eliminar restos de fitoplancton, sedimentos finos y microorganismos persistentes adheridos. A continuación, se trasladan a un segundo recipiente con agua de mar filtrada a 50 μm . Este paso tiene una doble finalidad: por un lado, reacondicionar el tejido después del *shock* osmótico y, por otro, eliminar los residuos y organismos asociados que aún puedan estar adheridos.

En algunos casos, dependiendo de la especie y del propósito del cultivo, se realiza un enjuague final con agua de mar estéril para reducir la presencia de microorganismos potencialmente patógenos, lo que mejora la viabilidad y el estado sanitario del material antes de su propagación.

Selección: La última etapa consiste en la selección de los individuos que serán utilizados para el cultivo, garantizando que solo aquellos con características óptimas sean empleados en la propagación. Para ello, se realiza una clasificación minuciosa en función del método de propagación, diferenciando entre aquellos que se propagarán de manera vegetativa (gametofitos o individuos sin estructuras reproductivas) y los que serán utilizados para obtener esporas (individuos cistocárpicos/carposporofitos o tetrasporofitos).

Además, en esta fase se descartan las macroalgas que presentan signos de necrosis, daños físicos severos o posibles infecciones, asegurando que el material seleccionado tenga una alta tasa de supervivencia y desarrollo óptimo. Con este proceso finaliza la fase de preparación de las macroalgas para su cultivo, dejándolas listas para la siembra en los sistemas de producción.

CULTIVO POR PROPAGACIÓN VEGETATIVA

Inoculación de líneas de cultivo

El cultivo vegetativo ha sido ampliamente desarrollado para las especies *C. chamissoi* y *G. lemaneiformis*. Para ello, se colectan frondas vegetativas de los bancos naturales,

caracterizadas por la ausencia de estructuras reproductivas globosas (cistocarpos) o en forma de almohadillas (tetrasporangios) sobre las pínulas de las macroalgas, y por presentar una superficie más plana o cilíndrica. Una vez recolectadas, las frondas se trasladan a las instalaciones del Laboratorio de Investigación en Cultivos Marinos (LICMA), donde se someten a un lavado con agua de mar filtrada a 0,45 μm y esterilizada con luz ultravioleta (UV). Además, se realiza una limpieza manual para eliminar epífitos y organismos asociados a estas especies. El cultivo vegetativo se ha llevado a cabo con éxito en *C. chamissoi*, empleando la técnica del encordado y el uso de la malla frutícola, siendo la primera de estas técnicas también efectiva para *G. lemaneiformis*.

Fragmentación de algas: La fragmentación y recuperación de individuos sin estructuras reproductivas se lleva a cabo en condiciones de laboratorio, donde se seccionan fragmentos del talo de *C. chamissoi* y *G. lemaneiformis* con longitudes de no más de 5 y 10 cm de largo respectivamente. Este proceso activa en ambas especies su capacidad de cicatrización inmediata y posterior regeneración, lo que se manifiesta en la formación de nuevas pínulas o ramas secundarias capaces de originar nuevos individuos. En *C. chamissoi*, la regeneración ocurre a través de una estructura especializada denominada *disco de fijación secundaria*, que permite la adhesión al sustrato o línea de cultivo seleccionada. A partir de esta base, se desarrollan nuevos individuos genéticamente similares al individuo original. Por otro lado, en *G. lemaneiformis*, la fragmentación no genera una estructura de fijación específica; sin embargo, tras la cicatrización, la rama principal continúa su crecimiento y desarrolla nuevas ramas secundarias, permitiendo la propagación de la macroalga.

Preparación de líneas: Las líneas de cultivo son estructuras compuestas principalmente por cuerdas o mallas cilíndricas (frutícolas) de polipropileno, materiales comúnmente utilizados en actividades marinas como la pesca o la acuicultura. La selección del tipo de estructura depende de las condiciones del área de cultivo y de la densidad de siembra elegida. Si el cultivo se lleva a cabo en zonas de poco oleaje o con corrientes marinas de baja intensidad, se emplean cuerdas, ya que facilitan la manipulación y requieren menos sujeción para fijar el alga fragmentada. En cambio, en áreas con oleaje y corrientes marinas más intensas, es mejor emplear las mallas frutícolas, que actúan como un sustrato capaz de contener los fragmentos de macroalgas y evitar su pérdida.

Encordado y malla frutícola: La técnica del encordado consiste en colocar frondas vegetativas fraccionadas entre dos líneas de cuerda, que se atan en los extremos y anadarlas empleando un rotor, de modo que las macroalgas quedan abrazadas por las cuerdas superior e inferior y se enrollan hasta cierto punto. Al ser retiradas del primer gancho, se genera una torsión negativa al sujetar las macroalgas a las líneas, que permite que se adhieran sin que se suelten. Cada cuerda recibe el nombre de *reinal*, y estas se colocan sobre una línea madre, formando una estructura similar a las ramas de un árbol. Este método se puede emplear tanto en el cultivo de fondo como en sistemas suspendidos tipo *long-line*, para el cultivo en el mar.

Mientras que la técnica de la malla frutícola consiste en introducir los inóculos vegetativos dentro de una malla cilíndrica de aproximadamente 1 pulgada de diámetro. Su principal característica es su elasticidad y su apertura, que no debe ser mayor a 5 mm, permitiendo así el paso del agua sin presionar el inóculo. Al igual que en el encordado, las mallas frutícolas se fijan a una línea madre, creando una disposición similar a las ramas de un árbol. Esta técnica es aplicable tanto en cultivos de fondo como en cultivos suspendidos. En ambos sistemas, la cantidad de inóculo utilizada es de 40 g por unidad de cultivo.

Elaboración de sistemas de cultivo

El sistema de cultivo se basa en una línea madre que se adjunta por un extremo a un fondeo y en el otro a una boya, lo que permite mantener la línea en posición vertical dentro de la columna de agua. Los fondeos están compuestos por bolsas confeccionadas manualmente con malla de pesca anchovetera. Para su fabricación, las bolsas se cortan en piezas de 93×70 cm, se pliegan longitudinalmente y se cosen en los bordes, dejando una única apertura en la que se introduce un hilo de nailon negro alquitranado. Estas bolsas se llenan con piedras de canto rodado hasta alcanzar un peso de entre 30 y 40 kg, garantizando la estabilidad del sistema en el fondo marino.

La línea madre se fabrica con cabo de polietileno de 1,27 cm de diámetro, cortado en trozos de 2,5 m de largo. De esta longitud, 0,5 m se destinan a los nudos en cada extremo, mientras que los 2 m sirven como superficie efectiva donde se colocan las líneas de cultivo con macroalgas encordadas. Las líneas de cultivo, conocidas como *reinales*, se elaboran con monofilamento de polipropileno o rafia, con una longitud de 1 m. Cada línea madre soporta 20 reinales, distribuidos de manera equidistante a lo largo de la cuerda. Este sistema de cultivo, conocido como “árbol”, está diseñado para optimizar el crecimiento y la producción de macroalgas (Baltazar-Guerrero, Castañeda-Franco y Oyola-Salvador, 2023).

Los nudos en los extremos de la línea madre se aseguran firmemente con rafia, anudando los retazos de forma que no se deshagan debido a la tensión provocada por el fondeo, la boya o el movimiento del mar. A continuación, se incorporan hileras de rafia de hasta 50 cm entre las trenzas del cabo, formando espacios llamados “orejas”, que permiten ajustarse y amarrar los reinales para evitar que se deslicen o se desprendan de la línea madre.

En el caso de un sistema de cultivo suspendido tipo *long-line*, se omite la boya en uno de los extremos y se anuda directamente al cabo principal del sistema. En este método, el fondeo se sustituye por un único canto rodado envuelto en malla anchovetera, proporcionando la estabilidad necesaria al “árbol” de cultivo y garantizando que se mantenga fijo y equilibrado en el agua, incluso en presencia de corrientes marinas.

Cultivo a partir de esporas

La producción de semilla se realiza en las instalaciones del Laboratorio de Investigación en Cultivos Marinos (LICMA), Figura 3.

Para llevar a cabo el cultivo mediante esporas o esporocultivo, es necesario disponer de frondas con estructuras reproductivas bien definidas, es decir, frondas cistocárpicas o tetraspóricas, que se recolectan en bancos naturales de diversas playas. Una vez recolectadas, las frondas se trasladan al LICMA, donde se someten a un lavado exhaustivo con agua de mar filtrada a $0,45 \mu\text{m}$ y se realiza una limpieza manual de los epífitos u

FIGURA 3
Mapa de ubicación del Laboratorio de Investigación en Cultivos Marinos (LICMA) sede San Andrés, Pisco-Ica, Universidad Científica del Sur, el Perú
($13^{\circ}43'49.3''\text{S}$, $76^{\circ}13'24.3''\text{W}$)



Nota: Consulte el descargo de responsabilidad en la página de derechos de autor para conocer los nombres y límites utilizados en este mapa.

Fuente: Google Maps. 2025. Mapa de ubicación del Laboratorio de Investigación en Cultivos Marinos en el Perú. [Consultado el 7 de marzo de 2025]. <https://www.google.com/maps>

organismos asociados, incluyendo macroalgas no objetivo y macroinvertebrados. La técnica de esporocultivo se realiza en varias etapas, que se describen a continuación.

Inducción a la esporulación

Es un proceso en el que las frondas son sometidas a distintos estímulos de estrés con el propósito de debilitar las células de la corteza y facilitar la apertura de los canales por donde se liberarán las esporas al medio acuoso. Este procedimiento puede realizarse mediante tres métodos principales, que pueden aplicarse de forma individual (uno a la vez) o de manera combinada. En múltiples estudios con macroalgas, la inducción compuesta ha demostrado ser la más eficiente en términos de cantidad y viabilidad de esporas obtenidas. Una vez finalizado el proceso de estrés, las macroalgas se colocan nuevamente en agua de mar filtrada a 0,45 μm y esterilizada con luz UV, manteniéndose en un rango de temperatura entre 15 y 22 °C. La obtención y germinación de esporas puede seguir dos estrategias principales: inocularlas directamente sobre cuerdas o mantenerlas en suspensión, procedimiento conocido como solución de esporas.

Las formas compuestas de inducción a la esporulación comprenden:

Desecación: Consiste en secar las frondas utilizando paños absorbentes en una primera fase, seguido de un periodo de secado a temperatura ambiente. El tiempo de exposición varía según la especie:

- *Chondracanthus chamissoi*: 3 a 5 horas
- *Gracilariopsis lemaneiformis*: 1 a 2 horas
- *Mazzaella canaliculata*: 8 a 24 horas

Oscuridad: El secado se realiza en ausencia de luz para evitar que la radiación lumínica degrade el tejido celular que rodea los contenedores de esporas (carposporangios o tetrasporangios). Además, este método ayuda a minimizar la deshidratación excesiva del tejido vegetal, preservando su integridad estructural.

Temperatura: Finalmente, se ha comprobado que realizar estos procesos en ambientes fríos (entre 12 y 15 °C) contribuye a la conservación del tejido vegetal y mejora los procesos de rehidratación posterior a los procesos de estrés. Mantener una temperatura baja permite que el agua vuelva a ingresar al tejido vegetal nuevamente en un tiempo menor y sin causar daño a las células que rodean los contenedores de esporas.

Asentamiento y germinación

El proceso de asentamiento puede realizarse mediante esporulación directa sobre bastidores, lo que requiere la rehidratación de las macroalgas en tinas de asentamiento tras la fase de estrés. En estas tinas, los individuos reproductivos liberan las esporas, que se depositan sobre los bastidores. Los bastidores son estructuras o marcos de PVC rodeados por cuerdas de rafia o papelillo, materiales que han demostrado ofrecer las mejores tasas de asentamiento y posterior germinación (Torres-Galarza *et al.*, 2023). Como alternativa a la esporulación directa, también se puede realizar el asentamiento y germinación mediante una solución de esporas. Para preparar esta solución, se requiere un matraz con un litro de agua de mar filtrada y esterilizada, en el cual se colocan aproximadamente 20 g de frondas reproductivas previamente estresadas. Con una aireación abundante durante dos horas, se favorece la liberación de esporas en el medio. Una vez obtenida la solución, las esporas se inoculan en los bastidores y se sigue el mismo procedimiento de asentamiento. En ambos métodos, el asentamiento se produce durante 48 horas, manteniendo condiciones de ausencia de movimiento de agua (sin recirculación). Tras este tiempo, comienza la fase de germinación de las esporas, que requiere movimiento de agua, ya sea mediante aireación o recirculación de agua de mar, para garantizar su correcto desarrollo.

Para *C. chamissoi*, el asentamiento directo en bastidores ha demostrado ser más eficiente, ya que sus esporas se fijan rápidamente en el material. Este método ha permitido obtener densidades de asentamiento de entre 250 y 500 esporas por centímetro lineal (sp/cm) de cuerda (Rios-Cruz *et al.*, 2023; Torres-Galarza *et al.*, 2023). Por otro lado, la solución de esporas ha resultado más efectiva en *G. lemaneiformis* y *M. canaliculata*, alcanzando asentamientos promedio de 195 ± 20 y 152 ± 12 sp/cm, respectivamente.

Mantenimiento y crecimiento de plántulas

Para el cultivo de *C. chamissoi*, el esporocultivo ha sido implementado con éxito en entornos reales de producción y siembra en el mar. El crecimiento de esporas se lleva a cabo en bastidores dentro de estanques de 40 L, utilizando agua de mar filtrada a $0,22 \mu\text{m}$, un fotoperiodo 12:12 (luz/oscuridad), temperatura variable entre 16 y 18 °C, salinidad entre 34 y 36 ups, pH de 7,5 a 8,0, oxígeno disuelto de $7,0 \pm 1,0$ mg/L y una irradiancia de $10 \mu\text{mol fotón/m}^2/\text{s}$ y aireación constante. El recambio de agua se realiza semanalmente, con la adición de Bayfolan® como fuente de nutriente en una proporción de 0,2 ml/L. Este proceso de cultivo se mantiene durante aproximadamente dos meses, hasta que las plántulas alcanzan un tamaño de 2 a 6 mm, momento en el que están listas para ser trasladadas al mar. Bajo estas condiciones, se obtiene un promedio 45 ± 9 plántulas por centímetro lineal de cuerda. Una vez en el mar, las cuerdas provenientes de esporocultivo pueden alcanzar una producción de biomasa de entre 820 y 1 020 g de macroalga cosechada por m/l tras 90 días de crecimiento. La producción en la fase de recuperación o poscosecha puede arrojar valores similares, dependiendo de la estación del año.

Para el caso de *G. lemaneiformis* y *M. canaliculata*, el asentamiento se ha realizado en ambientes más controlados, utilizando cuerdas de rafia o papelillo inmersas en placas Petri. El crecimiento se ha llevado a cabo en condiciones similares a las de *C. chamissoi*, con ciertas modificaciones en los parámetros ambientales según los requerimientos específicos de cada especie. Los valores de oxígeno disuelto y pH se mantuvieron constantes para las tres especies.

Para *G. lemaneiformis*, los mejores resultados encontrados fueron a un fotoperiodo 16:08 (luz/oscuridad), una temperatura entre 18 y 20 °C, salinidad entre 30 y 34 ups y una irradiancia de $14 \mu\text{mol fotón/m}^2/\text{s}$. Asimismo, el medio nutritivo empleado fue el Provasoli PES en una proporción de 20 ml/L. Estas condiciones se mantuvieron desde la fase de asentamiento hasta la generación de plántulas con un tamaño promedio de 3 mm.

Para *M. canaliculata*, inicialmente se estudió su potencial reproductivo con el objetivo de determinar los parámetros óptimos para maximizar la obtención y viabilidad de esporas. A diferencia de *C. chamissoi* y *G. lemaneiformis*, el agua de mar empleada para la rehidratación y posterior liberación de esporas debe estar enriquecida con medio Provasoli PES (10 ml/L) para obtener mejores resultados, especialmente en la viabilidad de las esporas. El asentamiento y germinación de plántulas se ha realizado directamente sobre placas Petri, a diferencia de *G. lemaneiformis* y *C. chamissoi*, donde el asentamiento se realizó sobre cuerdas embebidas. Como resultado, se obtuvieron plántulas de 3 a 4 mm en discos basales de múltiples talos. Las condiciones de cultivo y crecimiento fueron las siguientes: un fotoperiodo 16:08 (luz/oscuridad), una temperatura entre 13 y 15 °C, salinidad entre 35 y 37 ups y una irradiancia de $12 \mu\text{mol fotón/m}^2/\text{s}$. Asimismo, el medio nutritivo empleado fue el Provasoli PES en una proporción de 20 ml/L hasta el desarrollo de los discos basales y luego 30 ml/L cuando comenzaron a aparecer las yemas convergentes en microtalos. Actualmente, tanto para *M. canaliculata* como para *G. lemaneiformis*, se están realizando ensayos de siembra de plántulas obtenidas en laboratorio en ambientes marinos controlados.

Siembra en el mar

Una vez ensamblados los sistemas tipo “árbol”, se procede a realizar la siembra en el mar. Para ello, se llenan los fondeos con cantos rodados y se colocan a una distancia de 100 m más allá de la línea de costa. Posteriormente, se realizan monitoreos de crecimiento en mar mediante buceo semiautónomo. Durante estas inspecciones, se procede a limpiar el alga de posibles epibiontes y materia en suspensión. La cosecha se lleva a cabo tras 45 días de cultivo. Para el caso de *C. chamissoi*, el cultivo vegetativo produce en promedio 650 ± 80 g de biomasa cosechada por reinal. Mientras que en *G. lemaneiformis* la producción media alcanza $1\ 250 \pm 120$ g de biomasa cosechada por reinal.

La Figura 4 muestra fotografías que ilustran el ciclo de cultivo de macroalgas rojas de importancia comercial en el Perú.

CULTIVO DE ALGAS PARDAS DE IMPORTANCIA COMERCIAL EN EL PERÚ

Producción de plántulas de *Macrocystis pyrifera* “sargazo”

La producción de plántulas de macroalgas pardas cuenta con un flujo similar al cultivo de macroalgas rojas (Figura 5).

Cultivo vía esporas de macroalgas pardas

Se ha puesto especial énfasis en la producción de *M. pyrifera* debido a su importancia comercial para distintos grupos de alqueros, así como a los numerosos estudios previos sobre su producción de plántulas en distintos países. Además, esta especie altamente vulnerable a eventos oceanográficos como “El Niño”. El proceso consiste en la producción de plántulas en laboratorio, las cuales posteriormente se trasladan al mar para su siembra.

Colecta de frondas reproductivas

La recolección de frondas esporófilas de *Macrocystis*, se lleva a cabo en las playas de la Reserva Nacional de Paracas, en la provincia de Pisco, Ica. Las esporófilas son hojas especializadas situadas generalmente cerca del rizoides de *M. pyrifera*, donde presentan una mancha marrón oscura conocida como “soro esporangial”. Estas manchas pueden identificarse a simple vista o a contraluz, aunque bajo el agua pueden apreciarse de un color más claro. En la mayoría de los casos, la colecta se realiza a partir de individuos varados, pero si no se encuentran disponibles, también es posible obtenerlas de individuos frescos, siempre que se cuente con los permisos correspondientes. La técnica de recolección de individuos adheridos varía en función de la profundidad en la que se encuentren las macroalgas. En zonas de submareal rocoso, las frondas pueden ser recolectadas directamente. Si la profundidad es menor a 1,5 m, la recolección se realiza mediante *snorkeling*. Si los bosques de *Macrocystis* se ubican a profundidades superiores a 3 m, se utiliza buceo autónomo o semiautónomo. En todos los casos, se emplea la técnica del arrancado manual (Acleto, 1986) para asegurar la obtención adecuada del material sin comprometer la sostenibilidad del ecosistema.

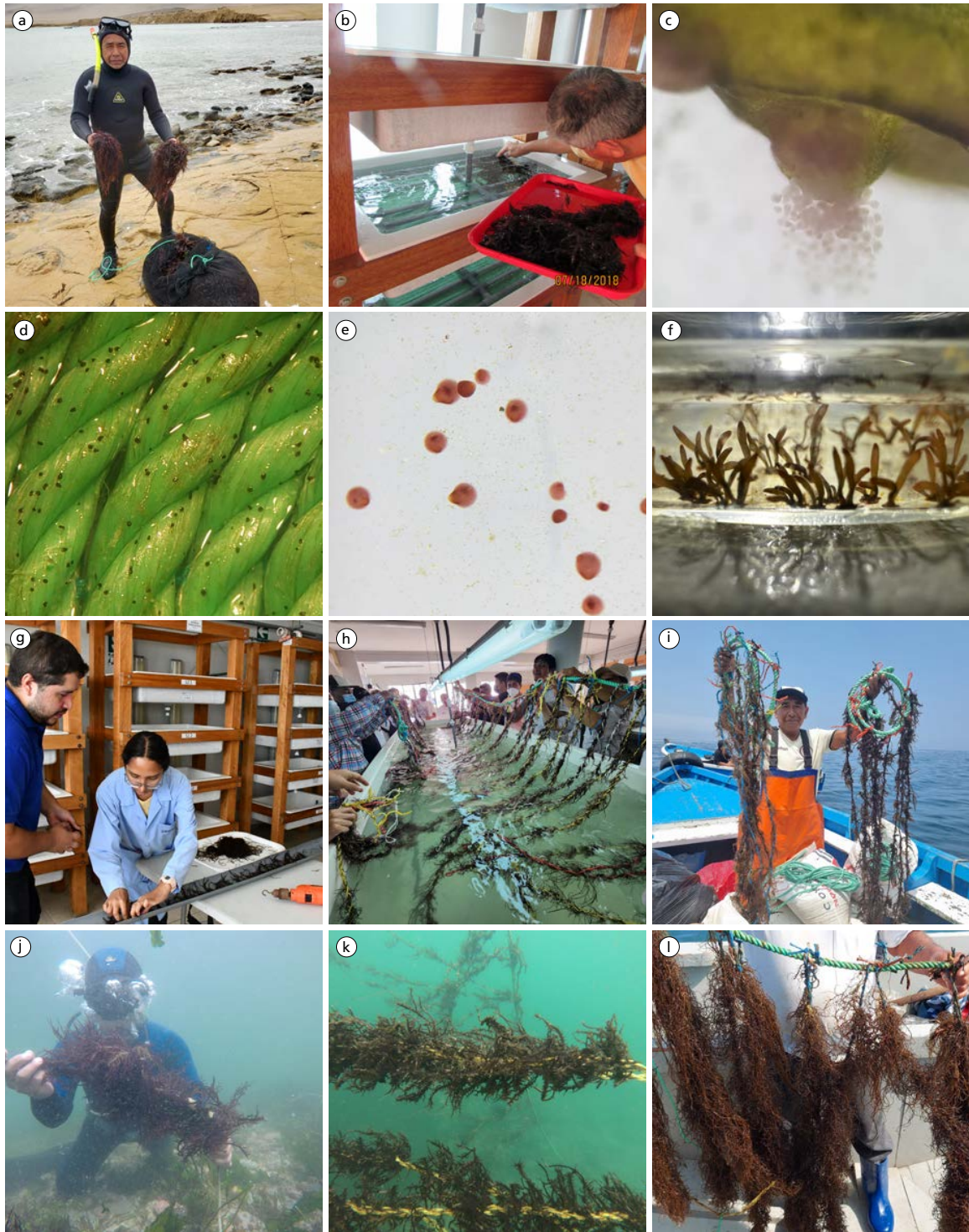
Pretratamiento

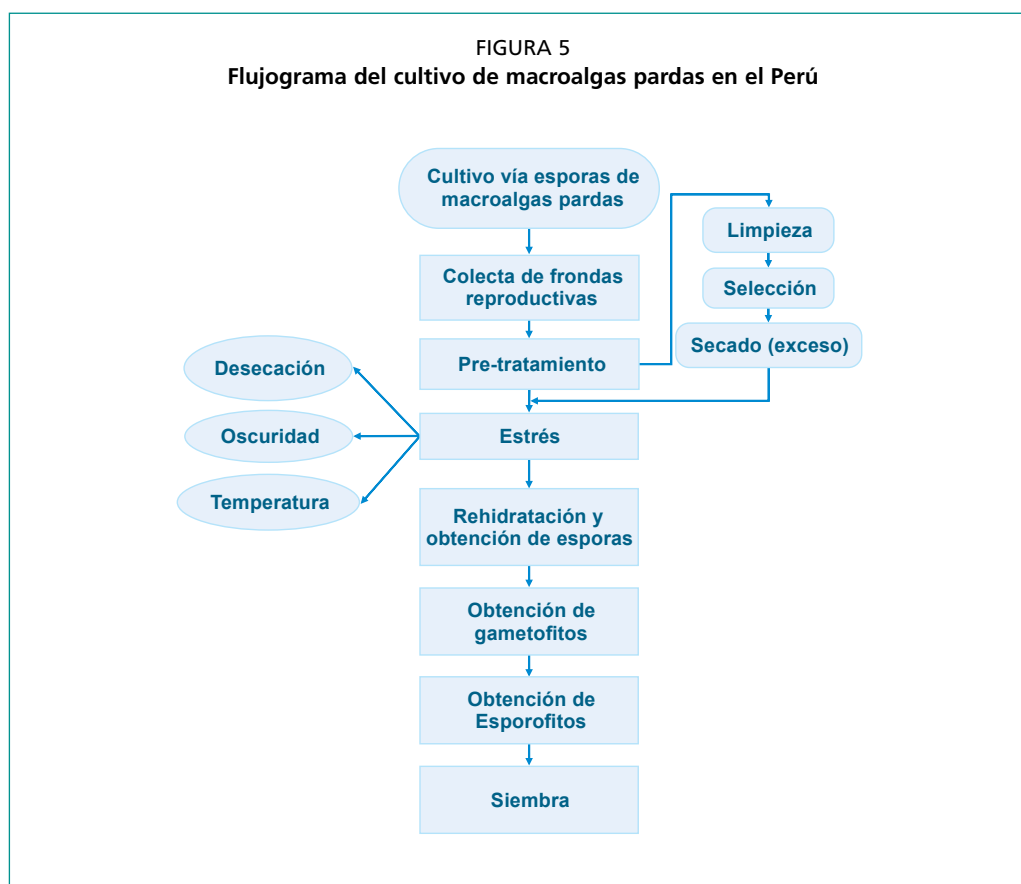
Los esporófilos recolectados se almacenan en bolsas herméticas y se trasladan en un contenedor térmico (*cooler*) con paquetes de hielo (*gel packs*), manteniendo una temperatura controlada de entre 5 y 10 °C para preservar su viabilidad hasta su llegada al laboratorio.

Una vez en el laboratorio, se inicia el pretratamiento, que comprende tres etapas clave: i) limpieza de frondas, eliminando impurezas y posibles organismos adheridos; ii) selección de frondas con estructuras reproductivas (soro esporangial), asegurando que solo aquellas con mayor potencial de esporulación sean procesadas y iii) secado

FIGURA 4
Cultivo de macroalgas rojas de importancia comercial en Perú

(a) Colecta de frondas de praderas naturales. (b) Colocación de frondas con estructuras reproductivas en estanques con bastidores para esporocultivo. (c) Cistocarpo de *G. lemaneiformis* en proceso de liberación de esporas. (d) Plántulas de *C. chamissoi* germinando sobre cabo papelillo. (e) Discos basales de *M. canaliculata* sobre placas Petri. (f) Discos basales con talos de 4 mm de *M. canaliculata*. (g) Proceso de encordado para cultivo vegetativo de *C. chamissoi*. (h) Armado de sistemas tipo "árbol" para la siembra de reinales de *G. lemaneiformis*. (i) Sistemas tipo "árbol" antes de ser sembrados en mar. (j) Monitoreo de cuerdas con frondas de *C. chamissoi* sembradas a partir de esporocultivo. (k) Monitoreo de cuerdas con frondas de *C. chamissoi* sembradas a partir de cultivo vegetativo. (l) Cosecha de cuerdas con frondas de *G. lemaneiformis* generadas por cultivo vegetativo.





del exceso de humedad, removiendo los geles exudados por las macroalgas durante el procedimiento para evitar alteraciones en la calidad del material.

Limpieza: A diferencia de otras macroalgas, la limpieza de las frondas esporófilas de macroalgas pardas se realiza mediante un lavado con algodón humedecido en agua de mar filtrada a 0,45 μm y esterilizada con luz ultravioleta (UV). Este método permite eliminar de manera eficiente las diatomeas y los sedimentos adheridos a las frondas, asegurando su adecuada preparación para las siguientes etapas del proceso.

Selección: Después del lavado, se procede a la selección de las frondas esporófilas en función de la presencia y calidad del soro esporangial. Se eligen aquellas que presentan un soro de color oscuro, ya que esto indica que aún contienen un alto número de esporas viables.

Por el contrario, se descartan las frondas que muestran signos de deterioro, como despigmentación, blanqueamiento o soros de tonalidad más clara. Estos últimos pueden haber liberado sus zoosporas antes de la colecta o encontrarse en una etapa de maduración incompleta, lo que reduciría su efectividad en el proceso de esporulación.

Secado (exceso): Una vez seleccionadas, las frondas se someten a un proceso de secado superficial para eliminar el exceso de agua. Para ello, se utilizan hojas de papel toalla, que absorben la humedad sin dañar la estructura del tejido.

A continuación, se recortan las secciones no fértiles de la fronda, conservando exclusivamente el área que contiene el soro esporangial. Este recorte optimiza el proceso de esporulación al concentrar el material reproductivo y reducir la presencia de tejido no funcional en las siguientes etapas del cultivo.

Estrés

Para inducir la liberación de zoosporas, las esporófilas deben someterse a un proceso controlado de estrés, basado en tres factores principales: desecación, oscuridad y temperatura.

Desecación: El proceso de desecación, similar al aplicado en macroalgas rojas, tiene como objetivo debilitar los canales de liberación de las zoosporas, facilitando su expulsión al medio acuoso. La duración de este proceso varía según el estado y origen del tejido vegetal:

- i) Individuos del intermareal: Las frondas suelen ser más delgadas y requieren un tiempo de secado más corto;
- ii) Individuos del submareal: al presentar frondas más gruesas y con mayor contenido de agua, el proceso de secado debe prolongarse para lograr el mismo efecto.

Este tratamiento se realiza en condiciones controladas para evitar un deterioro excesivo del tejido y optimizar la eficiencia en la liberación de esporas.

Oscuridad: Al igual que en las macroalgas rojas, el procedimiento de estrés en macroalgas pardas se realiza en condiciones de oscuridad para proteger los tejidos del daño ocasionado por una sobreexposición a intensidades lumínicas elevadas. Se ha determinado que niveles de luz superiores a $80 \mu\text{mol fotón/m}^2/\text{s}$ pueden inducir la degradación de los tejidos esporangiales, afectando la viabilidad de las zoosporas y reduciendo la eficiencia del proceso de esporulación. Mantener las frondas en ausencia de luz minimiza el estrés oxidativo y permite una mejor sincronización en la liberación de esporas.

Temperatura: Una vez eliminados los excesos de agua y seleccionados las secciones fértiles, los soros esporangiales se colocan entre hojas de papel toalla dentro de una bolsa hermética con cierre seguro para evitar la pérdida de humedad. Posteriormente, se refrigeran a una temperatura controlada de $4,0 \text{ }^\circ\text{C}$ durante un periodo de 12 a 24 horas en completa oscuridad.

Este tratamiento térmico contribuye a mantener la viabilidad de las zoosporas, ralentizando el metabolismo celular y asegurando que la liberación de esporas ocurra de manera óptima una vez finalizada la fase de estrés.

Rehidratación y obtención de esporas

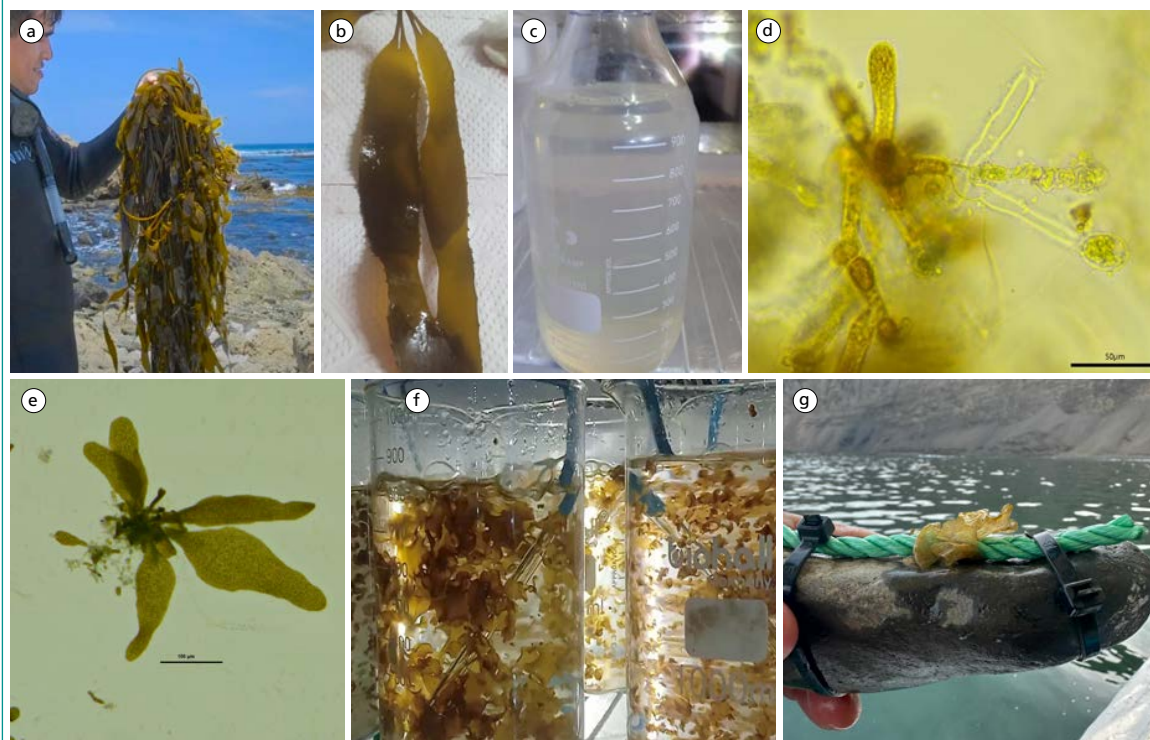
Transcurrido el tiempo de estrés, las frondas se rehidratan en vasos con 800 ml de agua de mar filtrada a $0,45 \mu\text{m}$, esterilizada con luz UV sin enriquecimiento, para evitar el crecimiento de diatomeas. En estas condiciones, se propicia la liberación de zoosporas durante 24 horas, tras las cuales se retiran los soros esporangiales, se filtra el volumen en nuevos vasos de precipitados previamente esterilizados con una malla Nitex ($35 \mu\text{m}$) y se recambia el 30 % del volumen total de agua con agua de mar enriquecida con Provasoli a razón de 20 ml/L.

Obtención de gametofitos

A partir de este punto, se mantiene el desarrollo de las zoosporas hasta su diferenciación como gametofitos masculinos y femeninos, permitiendo su posterior fertilización para la formación de esporofitos. El mantenimiento se realiza con recambios semanales de agua, retirando 300 ml del volumen total y complementando con agua de mar filtrada a $0,45 \mu\text{m}$ y enriquecida. Los parámetros de cultivo se mantienen durante seis semanas con un fotoperiodo 12:12 (luz/oscuridad), temperatura variable entre 13 y $15 \text{ }^\circ\text{C}$, salinidad entre 34 y 36 ups, pH de 7,5 a 8,0, oxígeno disuelto de $7,0 \pm 1,0 \text{ mg/L}$, una irradiancia de 4 a $6 \mu\text{mol fotón/m}^2/\text{s}$ y aireación constante hasta que los esporofitos tengan una talla de 3 o 4 cm, medida en la cual ya están aptos para ser trasladados y

FIGURA 6
Cultivo de *Macrocystis pyrifera*

(a) Colecta de frondas de praderas naturales. (b) Limpieza y obtención de esporangios. (c) Solución de zoosporas obtenidas. (d) Gametofitos masculinos y femeninos en desarrollo. (e) Esporofito en desarrollo. (f) Esporofito juvenil de 3 cm. (g) Proceso de siembra empleando cabos y sustratos naturales.



©LICMAP, Baltazar (6a), M. Castañeda (6b a la 6g)

sembrados en el mar. Se han producido en laboratorio un promedio de 250 plántulas por envase de 1,5 L aproximadamente.

Siembra

La siembra en el mar se realiza fijando una cuerda con una plántula de *M. pyrifera* sobre un canto rodado y colocando cada una en el fondo marino mediante buceo autónomo o semiautónomo. A los 100 días, la talla promedio de los individuos sembrados fue de $2,90 \pm 0,10$ m.

La Figura 6 muestra fotografías que ilustran el ciclo de cultivo de las macroalgas pardas de importancia comercial en el Perú.

CONCLUSIONES

Se están llevando a cabo diversos estudios sobre las macroalgas mencionadas con el objetivo de desarrollar biotecnologías de cultivo. Nuestras investigaciones han permitido establecer la producción de plántulas vía esporas, las cuales se fijan en sustratos artificiales, así como la propagación mediante implantes vegetativos. En ambos casos, las siembras en el mar se realizan en dos sistemas de cultivo: líneas de cultivo suspendido y sistemas semifondo, denominados internamente como “árboles”. Para las macroalgas rojas, se han obtenido cosechas en plazos que van desde los 45 días para el caso de *C. chamissoi* y 60 días para el caso de *G. lemaneiformis*, empleando técnicas de cultivo por propagación vegetativa, lo que permite considerarlas como una alternativa rentable. Las tasas de crecimiento en macroalgas pardas aún están en fase de evaluación en el mar. Se espera que en los próximos años el cultivo de macroalgas en el Perú se convierta en una actividad económica desarrollada y sostenible, basada en la producción de plántulas y semillas procedentes de laboratorios. Esto permitirá

una mejora en la productividad de los cultivos y garantizará un seguimiento sanitario adecuado, facilitando la implementación de cultivos intensivos. Además, se observa un incremento en las investigaciones enfocadas en otorgar valor añadido a las macroalgas, explorando sus aplicaciones como aditivos alimentarios para humanos y animales, biofertilizantes y bioestimulantes de crecimiento vegetal y, finalmente, su potencial en el control de enfermedades como el cáncer.

REFERENCIAS

- Acleto, C. 1986. Algunos aspectos biológicos de *Gigartina chamissoi* (C. Ag.) J. Agardh (Rhodophyta, Gigartinales). *Revista de Ciencias UNMSM*, 74(1): 38–47. https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/rev_ciencias/v74_n1/a04.pdf
- Alemañ, A.E., Robledo, D. y Hayashi, L. 2019. Development of seaweed cultivation in Latin America: current trends and future prospects. *Phycologia*, 58(5): 462–471. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1640996>
- Arbaiza, S., Avila-Peltroche, J., Castañeda-Franco, M., Mires-Reyes, A., Advíncula, O. y Baltazar, P. 2023. Vegetative Propagation of the Commercial Red Seaweed *Chondracanthus chamissoi* in Peru by Secondary Attachment Disc during Indoor Cultivation. *Plants*, (12): 1940. <https://doi.org/10.3390/plants12101940>
- Ávila-Peltroche, J. y Padilla-Vallejos, J. 2020. The seaweed resources of Peru. *Botánica Marina*, 63(4): 381–394. <https://doi.org/10.1515/bot-2020-0026>
- Baltazar-Guerrero, P.M., Castañeda-Franco, M.S. y Oyola-Salvador, W.B. 2023. *Manual de cultivo de Chondracanthus chamissoi* («yuyo» o «mococho»). Lima, 86 pp. <https://doi.org/10.21142/li.2023.3421>
- Baltazar, P. y Gonzáles, I. 1993. *Organismos Epizootos del Cultivo Experimental del Alga Agarofítica Gracilaria en la Localidad de los Chimus*. Dpto. Ancash. III Reunión Científica del Instituto de Ciencias Biológicas “Antonio Raymondi” UNMSM – Lima, p. 74. Libro de Resúmenes.
- Castillo, S., Espinoza, S. y Valdivieso, V. 1999. *Guía para el cultivo del alga Gracilaria y manejo de praderas naturales*. Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero (FONDEPES), 22 pp. https://biblioteca.imarpe.gob.pe/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=4298
- Cisneros, R., Bautista, J. y Santos, C. 1997. Cultivo experimental del alga *Gracilariopsis lemaneiformis* en ambiente natural. *Inf. Prog. Inst. Mar Perú*, N° 60. 10 pp. <https://repositorio.imarpe.gob.pe/bitstream/20.500.12958/1455/1/IP%2060.1.pdf>
- Huaman-Fernández, D., Baltazar-Guerrero P., Arbaiza-Quispe S. y Advíncula, O. 2024. Evaluación en la formación de discos de fijación secundaria de *Chondracanthus chamissoi* (yuyo) en condiciones de cultivo semi-controladas. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 53(2): 31–44. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2024.53.2.1269>
- FAO. 2022. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022*. Hacia la transformación azul. Roma, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0461es>
- Flores, D., Zavala, J., Donayre, S., Guardia, A. y Sarmiento, H. 2015. Evaluación poblacional de *Chondracanthus chamissoi* (C. Agardh, 1820) en las bahías de Pisco y Paracas, otoño 2010. *Informe Instituto del Mar del Perú*, 42(4): 504–509. <https://repositorio.imarpe.gob.pe/handle/20.500.12958/2998>
- IMARPE (Instituto del Mar del Perú). 2022. Anuario Científico Tecnológico IMARPE 2022. *Anuario científico Tecnológico Imarpe*, Vol. 22, 167 pp. <https://repositorio.imarpe.gob.pe/handle/20.500.12958/8357>
- PRODUCE (Ministerio de la Producción del Perú). 2022. *Anuario estadístico pesquero y acuícola*. 2022. Ministerio de la Producción, Lima, 185 pp. <https://www.producepresarial.pe/anuario-estadistico-de-pesquero-y-acuicultura-2022/>
- Rios-Cruz, L., Baltazar-Guerrero, P., Castañeda-Franco, M. y Arbaiza-Quispe, S. 2023. Efecto de la irradiancia y temperatura sobre esporofitos de *Chondracanthus chamissoi*. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 58(3): 148–154. <https://doi.org/10.22370/rbmo.2023.58.3.4261>

- Ruiz-Ipanaque, W., Baltazar-Guerrero P., Castañeda-Franco M. y Mires-Reyes, A.** 2024. Capacidad regenerativa postcosecha de la macroalga roja *Chondracanthus chamissoi* en dos sistemas de cultivo en la costa centro-sur del Perú. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 53(2): 67–84. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2024.53.2.1298>
- Torres-Galarza, S., Baltazar Guerrero, P., Arbaiza-Quispe, S. y Castañeda-Franco, M.** 2023. Settlement and growth of *Chondracanthus chamissoi* (Rhodophyta, Florideophyceae) carpospores on three types of substrates under semi-controlled laboratory conditions. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 18(2): 93–101. <http://doi.org/10.54451/PanamJAS.18.2.93>
- Uribe, R., Atoche-Suclupe, D., Paredes-Paredes, J. y Seclén, J.** 2020. Características bioecológicas de la macroalga roja *Chondracanthus chamissoi* (C. Agardh) Kützing (Rhodophyta, Gigartinaceae) en la zona intermareal del norte del Perú. *Boletín Instituto del Mar del Perú*, 35(2): 271–293.

Estado actual y perspectivas del cultivo de macroalgas en el Ecuador

Adrián Marquez

*Escuela Superior Politécnica del Litoral
Salinas, Ecuador*

Marquez, A. 2025. *Estado actual y perspectivas del cultivo de macroalgas en el Ecuador*. En: Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Murúa Andrade, P. y Farías Molina, A. (coords.). Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 24-26 de junio de 2024, Puerto Varas, Chile. *FAO Actas de Pesca y Acuicultura*. N.º 74. Roma, FAO. pp. 221-230.

RESUMEN

En 2023, el Ecuador se consolidó como líder mundial en la producción de camarón blanco (*Penaeus vannamei*), con la exportación de un millón de toneladas y la generación de 4 396 millones de USD, superando incluso a la industria petrolera. A pesar del gran potencial que presenta la acuicultura de peces, moluscos y macroalgas, este sector se enfrenta a importantes desafíos, como la falta de financiación, la escasez de incentivos y la inseguridad, incluyendo delitos y robos en los sistemas de cultivo. A nivel mundial, las macroalgas constituyen el segundo producto acuícola más relevante, con una producción de 34,7 millones de toneladas, principalmente en Asia. En América Latina, países como el Brasil, Chile, Colombia, Cuba, el Ecuador, México, Panamá, el Perú y la República Bolivariana de Venezuela cultivan macroalgas con diversos fines, que van desde el consumo directo hasta la obtención de bioproductos como la carragenina. En el Ecuador, aunque no existe tradición de consumo de macroalgas, se observa un creciente interés por la producción de *Kappaphycus alvarezii* para la elaboración de biofertilizantes y carragenina. Proyectos recientes también investigan el uso de especies nativas como *Acanthophora spicifera* y *Ulva lactuca* como tratamientos naturales frente a enfermedades que afectan a la acuicultura. La colaboración entre el ámbito académico y el Gobierno ha propiciado la creación de leyes orientadas a fomentar la diversificación acuícola y la exportación. Este documento analiza el estado actual de la producción de macroalgas en el Ecuador, poniendo de relieve tanto las oportunidades como los retos existentes.

INTRODUCCIÓN

Desde 2023, el Ecuador se ha posicionado como el principal productor mundial de camarón blanco (*Penaeus vannamei*), con un volumen de exportación de 1 millón de toneladas y unos ingresos de 4 396 millones de USD, superando incluso a la industria petrolera (El Universo, 2024). Sin embargo, la acuicultura de peces, moluscos y macroalgas sigue siendo incipiente, a pesar de su alto potencial de desarrollo (Jiménez y Torres, 2023). Diferentes instituciones de investigación trabajan en el desarrollo de tecnologías de cultivo adaptadas a las condiciones de las aguas ecuatoriales, con el objetivo de diversificar la producción nacional por acuicultura. Sin embargo, este sector aún se enfrenta a importantes desafíos, como la falta de financiación, la escasez de incentivos y los problemas de seguridad en los cultivos marinos. Aunque existen políticas para la concesión de espacios destinados a la maricultura, todavía faltan planes

de acción eficaces frente a los robos, los conflictos con pescadores, así como bancos de reproductores y sistemas adaptados a las especies locales de macroalgas.

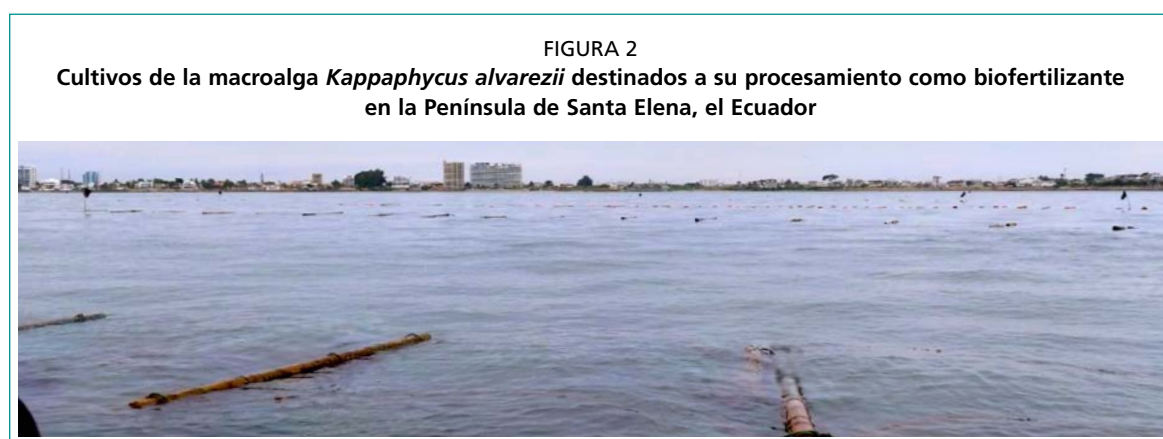
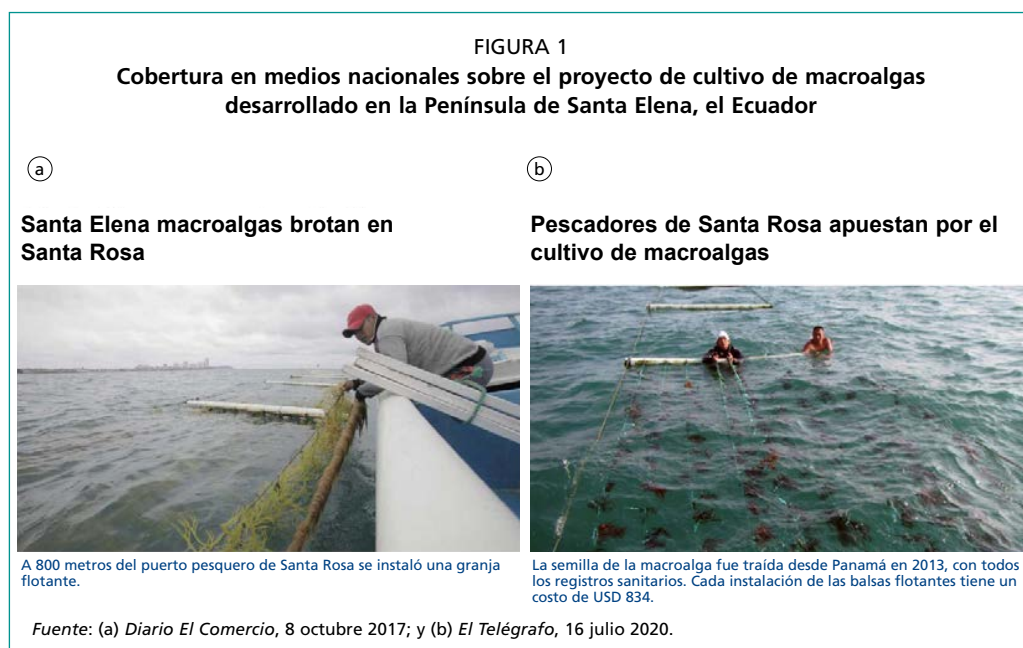
A nivel mundial, las macroalgas constituyen el segundo sector de mayor producción acuícola, con 36,5 millones de toneladas (FAO, 2024). La mayor parte de esta producción se concentra en el Japón, Indonesia, la República de Corea, la República Democrática Popular de Corea y Filipinas, que en conjunto representan más del 99 % del total global (Nayar y Bott, 2014). Fuera de Asia, aunque la producción es menor, las macroalgas siguen siendo una opción económicamente viable, contribuyendo a la bioeconomía circular y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. En América Latina, países como el Brasil, Chile, Colombia, Cuba, el Ecuador, México, Panamá, el Perú y la República Bolivariana de Venezuela cultivan macroalgas tanto para el consumo directo como para la elaboración de bioproductos como la carragenina (Alemañ, Robledo y Hayashi, 2019; Hayashi *et al.*, 2017; Montúfar-Romero *et al.*, 2023).

En el Ecuador, si bien no existe una cultura de consumo de macroalgas, se ha despertado un creciente interés por la producción de especies como *Kappaphycus alvarezii*, destinada a la elaboración de biofertilizantes y carragenina. En los últimos cinco años, se han desarrollado proyectos orientados al uso de *K. alvarezii* y de especies nativas como *Acanthophora spicifera*, *Ulva lactuca* y *Gelidium* sp. como quimio tratamientos naturales para moluscos y camarones (Guillén *et al.*, 2022, 2024). La costa ecuatoriana ha mostrado las tasas de crecimiento más elevadas para *K. alvarezii*, con un incremento diario promedio del 15 % durante su fase exponencial (Montúfar-Romero *et al.*, 2023), superando los registros de países como el Brasil y la India (Eswaran, Ghosh y Marirh, 2002; Hayashi *et al.*, 2017), y con resultados prometedores en términos de rentabilidad y productividad.

En los últimos años, la colaboración entre el ámbito académico y el Gobierno ha impulsado estudios y marcos legislativos orientados al desarrollo de nuevos sectores acuícolas, mediante la gestión de permisos y concesiones marinas exclusivas. Estas acciones han favorecido el fomento de la diversificación acuícola y han abierto nuevas oportunidades de exportación. Este documento ofrece una revisión del estado actual de la producción de macroalgas en el Ecuador, identificando tanto las oportunidades como los desafíos para mejorar su desarrollo.

PERSPECTIVA TÉCNICA DE LAS TECNOLOGÍAS DE CULTIVO

La acuicultura de macroalgas en el Ecuador se inicia en 2014 con la importación de inóculos de *K. alvarezii* desde Panamá y su implantación en cultivos ubicados en la zona de Santa Rosa de Salinas, en la Península de Santa Elena (Figura 1). Esta iniciativa surge de la colaboración entre cooperativas pesqueras y empresas privadas, con el objetivo de fomentar la diversificación de la acuicultura nacional. El proyecto comenzó con una hectárea de cultivo experimental, en la que se evaluaron tanto el crecimiento semanal de la biomasa como el contenido de carragenina, determinando la viabilidad técnica y económica mediante técnicas adaptadas del modelo de cultivo empleado para esta especie en el Brasil. Además, se capacitó a las personas integrantes de la cooperativa para que pudieran desarrollar el cultivo a mayor escala en todas sus etapas: siembra de inóculos, cultivo de engorde, cosecha y procesamiento poscosecha. En los años siguientes, se concretó una concesión marina de 10 hectáreas de producción, con una propuesta para implementar 72 balsas con una capacidad de 403 toneladas de masa húmeda. Sin embargo, uno de los principales desafíos fue obtener la inversión necesaria para alcanzar la biomasa mínima requerida para exportar macroalga seca a los mercados internacionales, destinada al posprocesamiento y la obtención de carragenina. Debido a esta limitación, la producción anual se redujo a 17 balsas, con una media mensual de 10 toneladas, producidas bajo demanda por empresas interesadas en el procesamiento de la macroalga fresca para la elaboración de biofertilizantes (Figura 2). A pesar de ello,



la experiencia ha generado buenas perspectivas de crecimiento, despertando el interés de otros grupos comunales que consideran esta actividad como un complemento viable a la pesca artesanal (comunicación personal, comunidades costeras de Santa Rosa de Salinas y Palmar, 2024).

De la mano con la producción local, se han desarrollado diferentes trabajos orientados a optimizar la producción local de *K. alvarezii*. El más relevante, reportado por Montúfar-Romero *et al.* (2023) evidenció la alta productividad de la región, con un crecimiento diario promedio de 15,2 % durante la fase de crecimiento exponencial de la macroalga. Esta cifra supera lo registrado en otras zonas de producción comercial como el Brasil, Indonesia y Viet Nam, donde las tasas no sobrepasan el 14 % (Eswaran, Ghosh, y Marirh, 2002; Hayashi, De Paula y Chow, 2007), lo que posiciona al Ecuador como una alternativa viable para la acuicultura local. Además, el estudio de Montúfar-Romero (2019) incluyó un análisis de factibilidad y viabilidad económica, que reveló una rentabilidad atractiva: un beneficio neto del 19 % sobre los ingresos proyectados y una tasa interna de retorno (TIR) del 16,5 %, con un período estimado de recuperación de la inversión en 4,3 años. Estos resultados subrayan el potencial del Ecuador para la producción de biomasa de macroalgas y consolidan esta actividad como una alternativa económicamente viable dentro del sector acuícola local. En los últimos tres años, se han impulsado proyectos centrados en la optimización de la producción, la valorización de la bioactividad para incrementar el valor añadido de los cultivos y el desarrollo de especies locales.

El primero de estos proyectos se desarrolló entre 2020 y 2021 bajo el nombre *Innovaciones basadas en algas para una acuicultura y una agricultura resilientes* (SIRENA, por sus siglas en inglés). Esta iniciativa fue una colaboración entre la Universidad de Gante, la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), la Asociación Flamenca para la Cooperación al Desarrollo y la Asistencia Técnica (VVOB, por sus siglas en neerlandés), Rikolto y Protos. El proyecto actuó como una hoja de ruta, identificando oportunidades para el uso de biomasa algal con aplicaciones biotecnológicas orientadas a optimizar la producción (Lema *et al.*, 2023; Valdez *et al.*, 2023), así como su uso potencial en el control de enfermedades que afectan a la acuicultura (Guillén *et al.*, 2024). También se identificaron macroalgas nativas con potencial para ser cultivadas en el Ecuador, como *A. spicifera* (Guillén *et al.*, 2022, 2024), lo que dio origen a nuevos proyectos, entre ellos *Biotecnología azul para el fortalecimiento de la industria acuícola ecuatoriana controlando Vibrios patógenos*. Este proyecto explora aplicaciones para el control de enfermedades patógenas de alto impacto, desarrollando protocolos de control de *Vibrio*, patógenos en cultivos de camarón, mediante la incorporación funcional, de forma singular o combinada, de microalgas, macroalgas, bacterias probióticas y productos extracelulares.

Un segundo proyecto relevante es *Desarrollo e implementación piloto de sistemas de maricultura genera incentivos a la conservación del manglar* (DIPSIMAR), en el marco del programa Redd Early Movers (REM). Sus principales objetivos son desarrollar tecnologías para el cultivo de macroalgas y moluscos nativos de manglares, así como explorar y desarrollar bioproductos de utilidad para las comunidades costeras. Esta iniciativa busca ofrecer alternativas sostenibles de obtención de recursos, al tiempo que contribuye a reducir la presión sobre los ecosistemas de manglar y promueve su conservación.

Dentro de la línea de investigación en tecnologías de cultivo y desarrollo de valor agregado, destaca el proyecto *Desarrollo de la bioeconomía de macroalgas: Estrategia sostenible para mitigar enfermedades emergentes del camarón*. Esta iniciativa se centra en la identificación y evaluación de macroalgas nativas con potencial para ser cultivadas, considerando su abundancia y riqueza en compuestos bioactivos que contribuyen a reducir las pérdidas económicas causadas por enfermedades acuícolas, especialmente en el cultivo de camarón. En colaboración con dos comunidades pesqueras, se llevan a cabo actividades acuícolas que incluyen estudios sobre el crecimiento tanto en condiciones marinas como en el laboratorio de macroalgas como *K. alvarezii* y especies nativas como *A. spicifera*, *U. lactuca* y *Gelidium* sp. (Figura 3). Estos dos últimos proyectos se encuentran actualmente en ejecución y está previsto que concluyan en noviembre de 2024.

Es posible constatar el potencial de cultivo que ofrece el Ecuador de la macroalga *K. alvarezii*, especialmente a partir de la experiencia acumulada durante más de 10 años de producción comercial en una comunidad de la Península de Santa Elena. A esta trayectoria se han sumado, en los últimos años, nuevas iniciativas orientadas a optimizar las tecnologías de producción y desarrollar manuales técnicos mejorados, que permitan la obtención de biocompuestos de interés para la industria, como formulación de alimento de camarón, así como validar su efecto terapéutico en el cultivo de juveniles de camarón *Panaeus vannamei*. Los análisis económicos han demostrado la factibilidad económica de la maricultura de *K. alvarezii*, y actualmente se encuentran en estudio otras especies locales que presentan grandes perspectivas para su cultivo.

PERSPECTIVA ECOLÓGICA, AMBIENTAL Y DE BIOSEGURIDAD

El Ecuador cuenta con condiciones ambientales y geográficas ideales para el cultivo de macroalgas. Su consolidación como actividad podría contribuir significativamente al desarrollo socioeconómico de las comunidades costeras del país, mediante la generación de empleo, la dinamización del comercio y el aprovechamiento sostenible



de los recursos, en el marco de una acuicultura de bajo impacto ambiental (Macas, 2022).

Las condiciones oceanográficas predominantes en las costas ecuatorianas, caracterizadas por aguas superficiales cálidas durante todo el año (entre 23°C y 28°C) y por florecimientos de nutrientes asociados a la influencia de la corriente fría de Humboldt (Chinacalle-Martínez *et al.*, 2021), resultan especialmente favorables tanto para los productores primarios como para los consumidores primarios.

Estudios realizados en el Ecuador han demostrado concentraciones promedio de clorofila *a* como un indicativo de la productividad primaria en las aguas costeras de la Península de Santa Elena, con valores medios de 4 mg/L de clorofila- α con picos mayores a 7 mg/L (Benetti *et al.*, 2010 y Lodeiros *et al.*, 2018). Estas concentraciones se consideran elevadas en comparación con otras regiones, especialmente si se tiene en cuenta que el valor mínimo para un crecimiento rentable de consumidores primarios,

como los moluscos bivalvos, se sitúa en torno a los 0,5 mg/L clorofila- α (Saxby, 2002). Esta hipótesis se ve respaldada por estudios como los realizados con la vieira *Nodipecten subnodosus*, que ha registrado la tasa de crecimiento en cultivo suspendido más alta reportada hasta la fecha en el Ecuador (Revilla *et al.*, 2019), comparable a lo observado para la macroalga roja *K. alvarezii*, que también ha mostrado la tasa de crecimiento más elevada según Montúfar-Romero *et al.*, 2023.

Además de ser fuente de proteína, las macroalgas están siendo ampliamente estudiadas por sus biocompuestos activos con aplicaciones en salud, acuicultura y producción sostenible. Un ejemplo destacado es *Aspargopsis taxiformis*, cuya incorporación reduce la emisión de metano en rumiantes, contribuyendo a una ganadería más sostenible (Roque *et al.*, 2021). El potencial nutracéutico de las macroalgas permite reemplazar proteínas vegetales en acuicultura, ofreciendo beneficios inmunoestimulantes, bactericidas, antivirulentos, antifúngicos y antioxidantes (Elizondo-Reyna *et al.*, 2016; Pádua *et al.*, 2015; Thanigaivel *et al.*, 2016).

Estudios en el Ecuador con *A. spicifera* muestran que sus extractos acuosos y etanólicos al 25 % controlan patógenos en cultivos de *Ostrea edulis*, especialmente contra *Vibrio coralliilyticus* (Guillén *et al.*, 2024). Además, investigaciones sobre *K. alvarezii* destacan cómo las condiciones ambientales afectan su actividad antioxidante y la composición de biocompuestos útiles para la industria alimentaria, farmacéutica y de fertilizantes (Lema *et al.*, 2023). También se han optimizado las condiciones de extracción etanólica de biocompuestos en *A. spicifera*, analizando su capacidad captadora de radicales y el contenido de fenoles y flavonoides (Valdez *et al.*, 2023). La Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) y sus centros de investigación, Centro Nacional de Acuicultura e Investigaciones Marinas (CENAIM) y Centro de Investigaciones Biotecnológicas del Ecuador (CIBE), lideran estas investigaciones en colaboración con universidades europeas como la Universidad de Gante, en Bélgica.

PERSPECTIVA ECONÓMICA, FINANCIACIÓN Y RENTABILIDAD

En el caso del Ecuador, los únicos datos publicados actualmente sobre rentabilidad corresponden al cultivo de *K. alvarezii*, el cual, gracias a su baja afectación por pérdidas, enfermedades o mortalidad, muestra resultados prometedores. La relación costo-beneficio es de 1,67, lo que indica que por cada USD invertido en el cultivo de macroalgas, se espera recuperar USD 1,67, con una producción anual estimada de 121,3 toneladas de alga secas. Según el estudio realizado por Montúfar-Romero *et al.* (2023), esta producción generaría ingresos anuales aproximados de USD 162 413,33. Aunque si se identifican costos significativos, relacionados con la adquisición de inóculos, mano de obra, producción y gestión administrativa, se obtiene un valor neto positivo de USD 58 326,63. Este resultado representa una señal alentadora, ya que se estima una tasa interna de retorno de 16,46 % y un período de recuperación de la inversión de 4,3 años, lo cual se considera razonable para este tipo de cultivos, dado su bajo nivel de inversión y riesgo (Alleway *et al.*, 2021). Actualmente, no existe información publicada sobre la rentabilidad de otras especies de macroalgas en el Ecuador.

PERSPECTIVA LEGAL Y DE GOBERNANZA

En el Ecuador, el Viceministerio de Acuicultura y Pesca, a través de la Subsecretaría de Acuicultura, es la entidad rectora en el ámbito de la acuicultura. Actualmente, el país cuenta con Ley Orgánica para el Desarrollo de la Acuicultura y la Pesca, aprobada en 2023, que establece el régimen jurídico para el desarrollo de las actividades acuícolas en todas sus fases: extracción, recolección, reproducción, cultivo, procesamiento, almacenamiento, distribución y comercialización, tanto a nivel comercial como para la exportación. Esta normativa proporciona un marco legislativo claro y transparente sobre los lineamientos para autorizar la actividad acuícola, incluyendo la producción de macroalgas, tanto nativas como de *K. alvarezii*, siendo esta última la única especie que,

hasta la fecha, cuenta con concesiones activas para su cultivo en el país (Viceministerio de Acuicultura y Pesca, 2023).

En la actualidad, no existe un plan oficial para el desarrollo de la maricultura de algas en el Ecuador; únicamente se han impulsado iniciativas desde instituciones académicas y centros de investigación orientadas a promover la diversificación acuícola. También se carece de incentivos específicos para la producción de especies distintas al camarón, lo cual representa una desventaja para avanzar hacia una mayor diversificación, especialmente en el caso de especies que constituyen una nueva frontera en la producción sostenible de recursos, como las macroalgas. Estas han demostrado tener una buena rentabilidad y cuentan con una experiencia de producción a pequeña escala de aproximadamente 10 años, liderada por cooperativas de pescadores artesanales que han incorporado esta actividad como complemento a la pesca. Esta práctica ha abierto la puerta al desarrollo de la producción de biofertilizantes en el Ecuador, que mueve cientos de millones de dólares al año y cuya creciente demanda nacional pone de manifiesto la vulnerabilidad que supone la dependencia de fertilizantes importados (Llive, 2016).

PERSPECTIVA PARA LA ALIMENTACIÓN Y OTROS USOS

El potencial del cultivo de *K. alvarezii* en el Ecuador es evidente, siendo su rentabilidad resultado de una alta tasa de crecimiento, alcanzando su máximo rendimiento —en términos de biomasa— entre los 33 y 40 días de cultivo, lo que permite obtener mayores volúmenes en menor tiempo.

En ensayos preliminares realizados por el CENAIM-ESPOL se han identificado cuatro especies con potencial para producción a gran escala: *Gelidium* sp., *A. spicifera*, *U. lactuca* y *K. alvarezii*. Estas podrían complementar la acuicultura de especies de alto valor comercial como el camarón blanco del Pacífico, mostrando resultados favorables en el uso de extractos de macroalgas para el control de patógenos en larvas y juveniles, de forma similar a los efectos positivos observados para *A. spicifera* en moluscos en etapa de *hatchery*. Las especies nativas del Ecuador se encuentran aún en fase de investigación para el desarrollo de tecnologías de cultivo, tanto en sistemas confinados (*Gelidium* sp. y *U. lactuca*) como en cultivo suspendido en el mar (*A. spicifera*), aplicando técnicas similares a las utilizadas con *K. alvarezii*.

Una de las principales oportunidades en el cultivo de *K. alvarezii* y otras especies locales radica en su potencial como complemento para abordar uno de los mayores desafíos de la acuicultura del camarón del Pacífico: la propagación de enfermedades derivadas de la intensificación de los sistemas de cultivo. Aunque tradicionalmente se han utilizado antibióticos para su control, su uso está actualmente prohibido o limitado en muchos casos por la resistencia antibacteriana que pueden causar (Martinez, 2009). Esta situación abre un mercado con gran potencial para el uso de compuestos naturales de bajo impacto ambiental que puedan actuar como métodos preventivos o tratamiento de enfermedades. En este contexto, las macroalgas cultivadas podrían desempeñar un papel clave, gracias a su uso potencial como nutraceuticos para camarones, como ya ha sido demostrado en otras especies de macroalgas (El Shafay, Ali y El-Sheekh, 2016; Immanuel *et al.*, 2012; Sivagnanavelmurugan *et al.*, 2014; Suwaree *et al.*, 2017; Vatsos y Rebours, 2015).

CONCLUSIONES

Aspectos económicos y medioambientales – La acuicultura de macroalgas en el Ecuador, aunque aún está en una fase incipiente, presenta grandes oportunidades tanto desde el punto de vista económico como medioambiental, especialmente para las comunidades costeras.

Diversificación y rentabilidad – Pese a los desafíos iniciales, el cultivo de *K. alvarezii* ha demostrado ser rentable, con una relación favorable entre costos e ingresos. Además,

se han identificado otras especies locales de macroalgas con un notable potencial para el cultivo y para el tratamiento de enfermedades que generan pérdidas económicas en la acuicultura. En el Ecuador, el desarrollo futuro de la bioeconomía azul dependerá en gran medida de la industria de las algas, que podría impulsar una producción más sostenible de alimentos funcionales para camarón, contribuir al control de enfermedades y favorecer la elaboración de biofertilizantes agrícolas.

Investigación y desarrollo – La investigación en tecnologías de cultivo de macroalgas está adquiriendo cada vez más relevancia en el Ecuador. Proyectos recientes exploran variedades nativas y aplicaciones biotecnológicas orientadas a incrementar la productividad y el valor añadido de las especies potenciales.

Marco legal y gobernanza – Actualmente, no existe un plan oficial para el desarrollo de la maricultura de macroalgas. Es fundamental avanzar hacia una mayor coordinación entre organismos gubernamentales y entidades académicas, con el fin de impulsar la diversificación de la acuicultura. El respaldo institucional será clave para el crecimiento de la industria de las macroalgas, generando empleo e ingresos, y produciendo proteínas, fertilizantes y quimiotratamientos sostenibles, especialmente para la industria del camarón.

Perspectivas futuras – La producción de macroalgas en el Ecuador tiene el potencial de cubrir la demanda nacional y expandirse hacia mercados internacionales. Su integración en sistemas acuícolas podría desempeñar un papel estratégico en el control de enfermedades y en el desarrollo sostenible de varios sectores industriales. Para consolidar esta industria, será fundamental promover programas de asistencia técnica orientados a la producción y comercialización de macroalgas, además de fomentar la inversión, fortalecer la infraestructura y estimular la creación de nuevos mercados.

REFERENCIAS

- Alemañ, A.E., Robledo, D. y Hayashi, L. 2019. Development of seaweed cultivation in Latin America: current trends and future prospects. *Phycologia*, 58(5): 462–471. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1640996>
- Alleway, H., Brummett, R., Cai, J., Cao, L., Reilly Cayten, M., Costa-Pierce, B.A., Dobbins, P., et al. 2021. Global principles of restorative aquaculture. *The Natural Conservancy*. https://www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/TNC_PrinciplesofRestorativeAquaculture.pdf
- Benetti, D., Rivera J., Velarde, E. y Velasco, M. 2010. *Estudios básicos para instalar proyectos de maricultura oceánica en diez sitios cercanos a puertos pesqueros artesanales en el Ecuador*. En: Consultoría para la elaboración de estudios básicos y de factibilidad para la implementación de proyectos de maricultura, Vol. 10.
- Chinacalle-Martínez, N., García-Rada, E., López-Macías, J., Pinoargote, S., Loor, G., Zevallos-Rosado, J., Cruz, P., et al. 2021. Oceanic primary production trend patterns along coast of Ecuador. *Neotropical Biodiversity*, 7(1): 379–391. <https://doi.org/10.1080/23766808.2021.1964915>
- El Universo. 2024. El camarón supera al petróleo como primer producto de exportación de Ecuador 24 de septiembre 2023. [Consultado el 21 de abril de 2024]. <https://www.eluniverso.com/noticias/economia/por-314-millones-el-camaron-destrono-por-primera-vez-al-petroleo-como-primer-producto-de-exportacion-nota/>
- Elizondo-Reyna, E., Medina-González, R., Nieto-López, M.G., Ortiz-López, R., Elizondo-González, R., Powell, M.S., Ricque-Marie, D. y Cruz-Suárez, L.E. 2016. Consumption of *Ulva clathrata* as a dietary supplement stimulates immune and lipid metabolism genes in Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Journal of Applied Phycology*, 28(6): 3667–3677. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0889-1>

- El Shafay, S.M., Ali, S.S. y El-Sheekh, M.M. 2016. Antimicrobial activity of some seaweeds species from red sea, against multidrug resistant bacteria. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 42(1): 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2015.11.006>
- Eswaran, K., Ghosh, P.K. y Marirh, O.P. 2002. Experimental field cultivation of *Kappaphycus alvarezii* (Doty) Doty. ex. P. Silva at Mandapam region. *Seaweed Res. Utiln.*, 24(1): 67–72.
- FAO. 2024. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. *Blue Transformation in action*. Rome. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd0683en>
- Guillén, P.O., Motti, P., Mangelinckx, S., De Clerck, O., Bossier, P. y Van Den Hende, S. 2022. Valorization of the chemical diversity of the tropical red seaweeds *Acanthophora* and *Kappaphycus* and their applications in aquaculture: A review. *En Frontiers in Marine Science* (Vol. 9). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.957290>
- Guillén, P.O., Rodríguez-Pesantes, D., Motti, P., Loor, A., Zheng, X., Wigby, J.N., Sonnenholzner, S., Mangelinckx, S., Bossier, P. y Van Den Hende, S. 2024. Characterized extracts of the tropical red seaweed *Acanthophora spicifera* protect *Ostrea edulis* larvae against *Vibrio coralliilyticus*. *Aquaculture*, 580(1). <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.740282>
- Hayashi, L., De Paula, E.J. y Chow, F. 2007. Growth rate and carrageenan analyses in four strains of *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Gigartinales) farmed in the subtropical waters of São Paulo State, Brazil. *Journal of Applied Phycology*, 19(5): 393–399. <https://doi.org/10.1007/s10811-006-9135-6>
- Hayashi, L., Reis, R.P., dos Santos, A.A., Castelar, B., Robledo, D., de Vega, G.B., Msuya, F.E., et al. 2017. *The cultivation of Kappaphycus and Eucheuma in tropical and subtropical waters*. En: A.Q. Hurtado, A.T. Critchley y I.C. Neish (eds.), *Tropical Seaweed Farming Trends, Problems and Opportunities: Focus on Kappaphycus and Eucheuma of Commerce* (pp. 55–90). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63498-2_4
- Immanuel, G., Sivagnanavelmurugan, M., Marudhupandi, T., Radhakrishnan, S. y Palavesam, A. 2012. The effect of fucoidan from brown seaweed *Sargassum wightii* on WSSV resistance and immune activity in shrimp *Penaeus monodon* (Fab). *Fish and Shellfish Immunology*, 32(4): 551–564. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2012.01.003>
- Jiménez, R. y Torres, G. 2023. Diagnóstico de la maricultura en Ecuador: oportunidades y desafíos. *AquaTécnica*, 5(3): 134–155. <https://doi.org/10.33936/at.v5i3.5814>
- Lema, E., Chóez-Guaranda, I., Ruíz-Barzola, O., Jaramillo, L.I., de Valgaz, Á.P.F., Van Den Hende, S. y Manzano, P. 2023. Study of the variability in time and space of the antioxidant activity and biochemical composition of *Kappaphycus alvarezii* at different stocking densities. *Bionatura*, 8(1). <https://doi.org/10.21931/RB/2023.08.01.13>
- Llive, F.M. 2016. Vulnerabilidad y dependencia internacional de fertilizantes en el Ecuador. En: *Revista Tecnológica ESPOL-RTE*, 29(2).
- Lodeiros, C., Rodríguez-Pesantes, D., Márquez, A., Revilla, J., Chávez-Villalba, J. y Sonnenholzner, S. 2018. Suspended cultivation of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* in the Eastern Tropical Pacific. *Aquaculture International*, 26(1): 337–347. <https://doi.org/10.1007/s10499-017-0217-z>
- Macas, L. 2022. Investigation of suitable areas for integrated multi-trophic culture of *Kappaphycus alvarezii* and *Crassostrea gigas* in Santa Elena-Ecuador. *OCEANS 2022 - Chennai*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/OCEANSCennai45887.2022.9775389>
- Montúfar-Romero, M., Rincones-León, R.E., Cáceres-Farías, L.B., Espinoza-Vera, M.M., Avendaño, U., Cruz-Jaime, T., Cubillos, L., et al. 2023. Feasibility of aquaculture cultivation of elkhorn sea moss (*Kappaphycus alvarezii*) in a horizontal long line in the Tropical Eastern Pacific. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41795-x>

- Martínez, J.L. 2009. Environmental pollution by antibiotics and by antibiotic resistance determinants. *Environmental Pollution*, 157(11): 2893–2902. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.05.051>
- Nayar, S. y Bott, K. 2014. Current status of global cultivated seaweed production and markets. *World Aquaculture*, 45(2): 32–37. <https://www.researchgate.net/publication/265518689>
- Pádua, D., Rocha, E., Gargiulo, D. y Ramos, A.A. 2015. Bioactive compounds from brown seaweeds: Phloroglucinol, fucoxanthin and fucoidan as promising therapeutic agents against breast cancer. *Phytochemistry Letters*, 14: 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2015.09.007>
- Revilla, J., Márquez, A., Lodeiros, C. y Sonnenholzner, S. 2019. Experimental cultures of giant lion's paw *Nodipecten subnodosus* in equatorial waters of the eastern pacific: Progress in larval development and suspended culture. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 47(5): 818–825. <https://doi.org/10.3856/vol47-issue5-fulltext-11>
- Roque, B.M., Venegas, M., Kinley, R.D., De Nys, R., Duarte, T.L., Yang, X. y Kebreab, E. 2021. Red seaweed (*Asparagopsis taxiformis*) supplementation reduces enteric methane by over 80 percent in beef steers. PLoS ONE: 16(3 March). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247820>
- Saxby, S.A. 2002. *Fisheries research report No. 132 - A review of food availability, sea water characteristics and bivalve growth performance at coastal culture sites in temperate and warm temperate regions of the world*. Department of Fisheries, Perth. Report 132. https://library.dpir.wa.gov.au/fr_rr/183
- Sivagnanavelmurugan, M., Thaddaeus, B.J., Palavesam, A. y Immanuel, G. 2014. Dietary effect of Sargassum wightii fucoidan to enhance growth, prophenoxidase gene expression of *Penaeus monodon* and immune resistance to *Vibrio parahaemolyticus*. *Fish and Shellfish Immunology*, 39(2): 439–449. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2014.05.037>
- Suwaree, K., Chen, Y., Yeh, S. y Chen, J. 2017. White shrimp *Litopenaeus vannamei* that have received fucoidan show protective immunity after ammonia stressing. *Journal of the Fisheries Society of Taiwa*, 42(3): 189–197. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25922.17602>
- Thanigaivel, S., Chandrasekaran, N., Mukherjee, A. y Thomas, J. 2016. Seaweeds as an alternative therapeutic source for aquatic disease management. *Aquaculture*, 464: 529–536. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.08.001>
- Valdez, A.N., Choez, I., Van Der Hende, S., Ruiz, O. y Manzano, P. 2023. Optimal conditions for the extraction of antioxidant compounds from the red alga *Acanthophora spicifera*. *Bionatura*, 8(1). <https://doi.org/10.21931/RB/2023.08.01.11>
- Vatsos, I.N. y Rebours, C. 2015. *Seaweed extracts as antimicrobial agents in aquaculture*. *Journal of Applied Phycology*, 27(5): 2017–2035. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0506-0>
- Viceministerio de Acuicultura y Pesca. 2023. ACUERDO N.º MPCEIP-VAP-A.M-2023-0002-A. *Plan Nacional de Control Sanitario de Acuicultura y Pesca*. <https://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2023/09/Plan-Nacional-de-Control-Sanitario-2023-Acuerdo-Ministerial-Nro.-MPCEIP-VAP-2023-0002-A.pdf>

Aspectos técnicos de la acuicultura de macroalgas en la República Bolivariana de Venezuela

Raúl E. Rincones, Sabrina Lovera Campos y José L. Narvaéz

Agromarina BIORMA Aquaculture C.A.

Caracas, República Bolivariana de Venezuela

Rincones, R.E., Lovera Campos, S. y Narvaéz, J.L. 2025. *Aspectos técnicos de la acuicultura de macroalgas en la República Bolivariana de Venezuela*. En: Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Murúa Andrade, P. y Farías Molina, A. (coords.). Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 24-26 de junio de 2024, Puerto Varas, Chile. *FAO Actas de Pesca y Acuicultura*. N.º 74. Roma, FAO. pp. 231-241.

RESUMEN

La maricultura comercial de macroalgas en la República Bolivariana de Venezuela se inició en 1990, contribuyendo al aprovechamiento sostenible de los recursos hidrobiológicos, a la seguridad alimentaria y al desarrollo económico local, con un impacto limitado y controlable sobre el medio ambiente. El cultivo de macroalgas favorece la inclusión social y la equidad de género, en la que las mujeres juegan un papel importante en todo el proceso productivo. Esta actividad representa una alternativa económica y de ingresos para las comunidades costeras, generando más de 600 empleos directos. En la actualidad se cultivan unas 60 hectáreas de *Kappaphycus alvarezii*, especie introducida desde Filipinas en 1996 con fines comerciales. Estos espacios están ocupados por acuicultores independientes y granjas corporativas (empresas privadas) ubicadas en el Estado Nueva Esparta, donde, a partir de 2019, se han producido cerca de 3 900 toneladas secas, destinadas a plantas procesadoras de carragenina ubicadas en el Brasil, Chile, la República de Corea y Túnez. En 2023, las macroalgas pasaron a ser el segundo producto de exportación acuícola después del camarón marino, previéndose el procesamiento industrial local de ficocoloides, fitobióticos, bioestimulantes y para consumo humano. Aún es necesario fortalecer el marco jurídico, incluyendo concesiones a largo plazo y la asignación de áreas exclusivas para la actividad en las zonas marino costeras.

INTRODUCCION

En la República Bolivariana de Venezuela, las algas marinas han sido conocidas tradicionalmente como “limo”, sinónimo de desecho o basura sin ninguna utilidad para la mayoría de las comunidades costeras. El primer estudio de valorización económica se realizó en la costa norte de la península de Paraguaná, estado Falcón (12°11'44"N 70°01'30"W), a finales de la década de 1970, cuando se evaluaron bancos naturales de varias especies de Gracilariales y Gelidiales con vistas a su aprovechamiento como materia prima para la industria de agar (Foldats, 1980).

Los primeros ensayos de maricultura se realizaron con *Gracilaria cornea* entre 1986-87 en la misma localidad (Rincones, 1990). Entre 1988 y 1994, la empresa Geles

del Caribe (GELCA), perteneciente al Grupo Polar (www.empresaspolar.com), operó una planta procesadora de agar y carragenina en la ciudad de Cumaná para autoabastecer la demanda nacional de ficocoloides, iniciando así un programa de maricultura en la península de Araya (10°37'43" N, 64°10'35" O) con especies locales de Gracilariales para la obtención de agar alimenticio (Racca *et al.*, 1993; Rincones, Rubio y Racca 1992; Rincones y Rubio 1999; Dawes, 1996; Rincones, 2000). En 1996, la empresa BIOTECMAR C.A., creada por antiguos trabajadores de GELCA, reactivó una granja piloto de *Gracilariopsis tenuifrons* en la Península de Araya para la producción de agar. Ese mismo año, BIOTECMAR importó desde Filipinas 5 kg de implantes de *Kappaphycus alvarezii* var. (conocida localmente como *tambalang*) y *Eucheuma denticulatum*, siguiendo todas las regulaciones de las autoridades ambientales y acuícolas.

El material introducido provenía de granjas comerciales de la empresa GENU Philippines (CP Kelco) en el Mar del Bohol. Se exportaron 150 toneladas de *K. alvarezii* a plantas procesadoras de carragenina en Dinamarca y Francia (1999–2001) (Rincones y Rubio, 1999; Rincones, 2000; Smith y Rincones, 2006). Debido a los bajos precios del mercado internacional de *E. denticulatum*, su cultivo fue postergado, retirándose todo el material del medio natural. Para finales del año 2001 y hasta la fecha actual, no se ha registrado su presencia en los ecosistemas locales (Smith y Rincones, 2006).

En el año 2001 se paralizaron las actividades de cultivo debido a las inconsistencias y contradicciones del marco normativo relacionado con la propagación de especies introducidas (Smith y Rincones, 2006). Sin embargo, un estudio de campo realizado en los cultivos en la Isla de Coche (10°48'23"N, 63°57'37" O), logró determinar que las parcelas de *K. alvarezii* aumentaron la biodiversidad, particularmente de peces e invertebrados, sin mayores efectos sobre las praderas de fanerógamas (Salazar, 2000).

Tras una prolongada pausa de 18 años, en 2019 se autorizaron las primeras operaciones comerciales a partir de las extracciones de bancos naturales de *E. isiformis* y *K. alvarezii*, destinadas posteriormente a la exportación a plantas procesadoras de carragenina en Chile, la República de Corea y Túnez. En 2020 se concedieron los primeros permisos para cultivos pilotos comerciales de *K. alvarezii* en el Estado Nueva Esparta, inicialmente a tres empresas privadas; y, a partir de 2023, se han otorgado permisos también a acuicultores independientes. Tras más de dos años de debates, consultas y revisiones, en diciembre de ese mismo año una resolución conjunta, emitida por las autoridades ambientales y acuícolas, estableció las normas técnicas para el aprovechamiento, cultivo, y actividades conexas de macroalgas y cianobacterias (Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela. N.º: 42787. 2023). Este nuevo marco normativo tiene como objetivo facilitar el desarrollo de la maricultura y comercialización de macroalgas.

PRINCIPALES RECURSOS GENÉTICOS

Los cultivos experimentales y comerciales se han llevado a cabo a partir de la propagación vegetativa o clonal de implantes. Las distintas especies y variedades seleccionadas se han caracterizado por su rápido crecimiento, su resistencia a determinadas condiciones ambientales y ecológicas, y por la síntesis de compuestos de interés comercial. Entre ellos destacan, además de los ficocoloides (agar y carragenina), los bioestimulantes agrícolas y productos para la elaboración de bebidas y alimentos destinados al consumo humano (Racca *et al.*, 1993; Rincones, Rubio y Racca 1992; Rincones, 2000; Smith y Rincones, 2006). En la Figura 1 se presentan las principales especies cultivadas y explotadas comercialmente en la República Bolivariana de Venezuela.

Kappaphycus alvarezii var. *tambalang* (Doty) comb. ined. Variedades verdes y pardas fueron introducidas en la República Bolivariana de Venezuela en el año 1996 con fines comerciales (Rincones y Rubio, 1999; Rincones 2000). Originaria del sudeste asiático,



es una de las principales especies de macroalgas cultivadas en el mundo, al ser una fuente importante de carragenina y bioestimulantes agrícolas. En la actualidad, es la única especie cultivada en el país, representando un 54 % del total exportado desde 2019.

Eucheumatopsis isiformis (C. Agardh) Núñez-Resendiz, Dreckmann y Senties, 2019. Especie endémica del Caribe (Cheney, 1988), fue reportada inicialmente en la República Bolivariana de Venezuela como *Eucheuma isiforme* por Rodríguez de Ríos (1965), en el Parque Nacional Mochima. Se encuentra creciendo en forma natural en las Islas de Cubagua, Coche y Margarita, Estado Nueva Esparta.

Gracilariopsis tenuifrons (C.J. Bird y E.C. Oliveira) Fredericq y Hommersand, 1989. Inicialmente identificada como *Gracilaria lemneiformis* (Racca *et al.*, 1993; Rincones, Rubio y Racca 1992). Fue cultivada comercialmente en la península de Araya a partir de material colectado en los bancos naturales por las empresas Geles del Caribe C.A. (1990-94) y BIOTECMAR (1995-96), como materia prima para la obtención de agar alimenticio.

LA MARICULTURA DE MACROALGAS EN LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA

El Estado Nueva Esparta representa la principal zona de producción de macroalgas de la República Bolivariana de Venezuela, tanto a través de la maricultura como de la explotación comercial de bancos naturales. Los principales centros de cultivo se localizan en el municipio Tubores, especialmente en las localidades de Punta de Piedras, Los Capotillos, Atolladar, El Guamache y la Isla de Cubagua. También existen granjas comerciales en la vecina Isla de Coche, en el sector El Oasis del municipio Villalba.

La productividad de las granjas marinas depende de varios factores, entre ellos la fertilidad del entorno, la época del año, la calidad de la cepa utilizada y su capacidad de adaptación a las condiciones y variaciones del lugar seleccionado, la frecuencia e intensidad de las perturbaciones bióticas y abióticas, así como las buenas prácticas aplicadas por los acuicultores (Doty, 1987; Santelices, 1999; Neish, 2003, 2008; Ask, 1999).

Las condiciones ambientales que presenta cada una de estas localidades (profundidad, oleaje, corrientes, turbiedad, temperatura, salinidad y tipo de sustrato) determinan los sistemas de cultivo empleados, que se basan principalmente en el uso de cuerdas de polipropileno para sujetar los implantes, con ciclos de producción que varían entre 5 y 6 semanas. La zona nororiental del país es una de las más fértiles de la cuenca del Caribe, gracias a los fenómenos estacionales de surgencia o afloramiento, que genera una alta productividad primaria en la que se incluyen a las macroalgas (Gómez, 1996; Herrera y Febres-Ortega, 1975). La mayoría de las parcelas de cultivo en el Estado Nueva Esparta se encuentran en zonas protegidas de fuertes vientos, oleaje y corrientes.

Métodos de fijación o amarre de implantes

Para el cultivo de *K. alvarezii* se emplean dos métodos de fijación de implantes al sustrato: a) rafias plásticas *tie-tie* y b) **malla tubular**. Conocido en el sudeste asiático como *tie-tie*, esta técnica consiste en amarrar los implantes a la cuerda principal a través de un nudo corredizo simple o un lazo conocido como *Made Loop*, utilizando rafias plásticas o cuerdas de 1 y 2 mm de diámetro (Neish, 2003, 2008) (Figura 2a). Este sistema se ha mantenido a lo largo del tiempo por su simplicidad, el uso de materiales económicos y fácilmente disponibles, y sus buenos resultados en términos de crecimiento (Ask, 1999; Ask y Azanza, 2002).

El sistema de redes o **mallas tubulares** plásticas se emplea en los cultivos de la empresa BIORMA en la Isla de Coche. Su uso ha mostrado índices de productividad y crecimiento superiores al de *tie-tie*, y puede utilizarse en zonas con mayor movimiento de agua y oleaje, disminuyendo considerablemente las pérdidas de implantes debido al desprendimiento. Este tipo de malla fue adaptado para el cultivo de macroalgas en el Brasil, a partir del material utilizado para el cultivo de mejillones, y actualmente se emplea con éxito en la India y el sudeste asiático (Goés y Reis, 2011) (Figura 2b).

Sistema de fondo suspendido (*Off-bottom*)

Las zonas donde se desarrolla la maricultura de macroalgas en el Estado Nueva Esparta presentan características favorables, como oleaje moderado, temperaturas entre 25 °C y 29 °C, salinidades entre 32 y 36 ppm y extensas áreas someras con profundidades inferiores a 2 m. Estas condiciones permiten el uso del sistema de fondo suspendido, también conocido como *Off-bottom*, en el que las cuerdas de cultivo se amarran a estacas fijadas al fondo (Figura 2c). Se trata del sistema más tradicional, de fácil manipulación y económico (Neish, 2003, 2008; Ask, 1999; Foscarini y Prakash, 1990; Msuya, 2011). Se instalan módulos de cuerdas de polipropileno de 3 o 4 mm de diámetro y 25 m de longitud, atadas a líneas madres de 5 mm de diámetro en cada extremo. Estas se fijan al fondo con estacas de madera de 5 cm de diámetro y 1,5 m de longitud dispuestas en el sentido de la corriente marina (Figura 2d). En cada cuerda de 25 m de longitud se



amarran unos 100 implantes, con un peso inicial promedio de entre 5 y 7 kg. El ciclo de maduración del alga es de 45 a 60 días, alcanzando pesos finales de entre 100 y 120 kg húmedos por cuerda.

Sistemas flotantes

Balsas flotantes

En profundidades superiores a 2 m se usan **balsas flotantes**, que mantienen las macroalgas cerca de la superficie del agua, asegurando así una exposición adecuada a la luz solar y temperaturas favorables para su desarrollo. Este sistema también ofrece protección frente al pastoreo de organismos bentónicos, con un impacto reducido en los ecosistemas locales. Las balsas están compuestas por celdas de 15 m² (3 × 5 m), sostenidas por tubos de PVC sellados o varas de bambú de 3 o 4 mm de diámetro y

5 m de longitud. Las celdas están conectadas entre sí por cuerdas de polipropileno de 8 o 10 mm de diámetro. En cada celda se atan 10 cuerdas de 5 m de longitud, en las que se ubican 200 implantes. Las balsas se fijan al fondo por medio de lastres de cemento de 150-200 kg cada uno, aunque también se emplean barras metálicas como sistema alternativo de anclaje (Figura 2e).

Palangre o long-line

En la Isla de Coche se utiliza el sistema de monolíneas flotantes tipo **palangre o long-line**, empleando cuerdas de 4 mm de diámetro y 100 m de longitud. Estas monolíneas se fijan al fondo mediante sacos de arena y piedras, bloques de cemento o anclajes de hierro. Cada *long-line* de 100 m lleva 400 implantes, y se utilizan boyas plásticas como sistema de flotación, colocadas cada 20 m de separación. Asimismo, el uso de sacavueltas en las uniones de cada *long-line* permite compensar el movimiento angular de las cuerdas causado por el arrastre vertical u horizontal del sistema en su conjunto (Figura 2f).

Para el cultivo comercial de *G. tenuifrons* en la península de Araya se han empleado múltiples métodos de amarre y suspensión, mediante un sistema intensivo de alta densidad en estructuras flotantes de cuerdas de polipropileno (Figura 2g). En estas estructuras flotantes se emplearon como flotadores envases plásticos de 20 L, formando unidades de 900 m² (30 × 30 m), divididas en 25 celdas de 6 × 6 m. En cada celda se colocan 22 líneas de 6 m, lo que da un total de 550 cuerdas por unidad de cultivo (Racca *et al.*, 1993; Rincones *et al.*, 1993; Dawes, 1996).

Secado, limpieza, almacenamiento y comercialización

Tras el período de crecimiento, que requiere al menos unos 45 días para alcanzar la maduración y concentración de ficocoloides necesaria, se cosechan las cuerdas para su posterior secado al sol durante 48 horas sobre sustratos consolidados, como conchilla, cemento y piedras. A continuación, se realiza un proceso de limpieza manual para eliminar residuos como cuerdas, plásticos, piedras, conchas, vidrios, animales y otras algas. Una vez limpias, se empacan en sacos de polietileno o se presan en fardos o bultos, con peso promedio de 30 kg, humedad máxima de 37 % y un contenido de impurezas no superior al 3 %. Finalmente, la materia prima es almacenada en lugares frescos (entre 25 °C y 30 °C) con suficiente ventilación natural (Figura 3).

PRODUCCIÓN Y PRODUCTIVIDAD DE LAS PRINCIPALES ESPECIES DE CULTIVO EN LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA

En el Cuadro 1 se presenta un resumen de las principales especies cultivadas bajo diferentes sistemas en la República Bolivariana de Venezuela, incluyendo las experiencias previas y la extracción de bancos naturales. El cultivo de *K. alvarezii* ha demostrado ser el más productivo y eficiente de todos, con una tasa de crecimiento diario de entre el 4,5 % y el 6,45 % desde el reinicio de su cultivo comercial en 2020. En el período 2019-2023 se han exportado un total de 3 853 toneladas de algas secas a plantas procesadoras en el Brasil, Chile, la República de Corea y Túnez, según los datos estadísticos del Instituto Socialista de la Pesca y Acuicultura (INSOPESCA). De ese total, 1 607 toneladas provienen de cultivos de *K. alvarezii* y 459 toneladas de sus bancos naturales, lo que representa un subtotal de 2 066 toneladas. Por otra parte, la explotación de los bancos naturales de *E. isiformis* ha generado un volumen de 1 795 toneladas.



ESTRUCTURA ORGANIZATIVA DE LA MARICULTURA DE MACROALGAS EN LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA

Acuicultores independientes

Están conformados por grupos familiares que se dedican al cultivo de macroalgas desde 2022. Recientemente, se han organizado mediante un comité general y subcomités en cada una de las comunidades. Estos productores están regulados y certificados por INSOPESCA, organismo adscrito al Ministerio de Pesca y Acuicultura.

CUADRO 1

Resumen de la producción y productividad de las especies de macroalgas en la República Bolivariana de Venezuela, incluyendo cultivos pilotos, comerciales y explotación de bancos naturales en el período 1986-2023

Actual (2019–2023)						
Especie	Usos y aplicaciones	Sistema de producción	Nivel de producción	Productividad TCD* (%)	Producción (Toneladas)**	Referencia
<i>K. alvarezii</i>	Carragenina Bioestimulantes Bebidas (seamoss)	Cultivo fondo, <i>long-line</i> y explotación de bancos naturales	Comercial 2019–2024	4,3–6,45	2 066	Este estudio
<i>E. isiformis</i>	Carragenina Bebidas (seamoss)	Explotación Bancos naturales	Comercial 2019–2024	Bancos naturales	1 795	Este estudio
Anteriores						
<i>K. alvarezii</i>	Carragenina	Cultivo Fondo y flotante	Comercial 1996–2001	4,41–7,75		Rincones y Rubio (1999)
<i>E. isiformis</i>	Carragenina	Cultivo Fondo y flotante	Experimental 2018	5,54–6,69		Montoya <i>et al.</i> (2020)
<i>Eucheuma denticulatum</i>	Carragenina	Cultivo Fondo y flotante	Experimental 1996–1999	2,35–5,34		Rincones y Rubio (1999)
<i>Gracilariopsis tenuifrons</i>	Agar alimenticio	Cultivo Fondo y flotante	Comercial 1989–1996	2–7,2		Racca <i>et al.</i> (1993) Rincones, Rubio y Racca (1992)
<i>Gracilaria cornea</i>	Agar	Cultivo Fondo	Experimental	1,45–3,20		Rincones (1990)

* Tasa de crecimiento diario. $TCD = \ln(Pf-Po)/t \times 100$. Pf= peso final, Po=peso inicial, t: días de cultivo **Producción nacional peso seco bruto.

Fuente: INSOPESCA (Instituto Socialista de la Pesca y Acuicultura). 2023. *Estadísticas del sector pesquero y acuícola en la República Bolivariana de Venezuela* (www.insopesca.gob.ve).

A través de acuerdos previos entre el comité de acuicultores independientes y las empresas comercializadoras, se fijan las condiciones de compra y se garantiza el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos por las partes involucradas. Durante las actividades de comercialización se cuenta con la presencia y supervisión de un funcionario del INSOPESCA. El precio en la playa establecido en junio de 2024 es de 350 USD por tonelada para *K. alvarezii*, con una humedad máxima del 37 % y un contenido de impurezas del 3 %. El precio de *E. isiformis* extraída de los bancos naturales era de 250 USD por tonelada, con los mismos parámetros de calidad de *K. alvarezii*.

La mayor concentración de parcelas independientes se encuentra en la comunidad de Punta de Piedras, municipio Tubores, Estado Nueva Esparta (Cuadro 2). En el primer semestre del año 2024 había un total de 346 parcelas en producción, ocupando una superficie de 46 ha. El área promedio por parcela oscila entre 0,06 y 0,21 hectárea. Cada parcela cuenta con un promedio de entre 80 y 100 cuerdas de 25 m de longitud, alcanzando un peso final húmedo de unos 9 600 kg, lo que equivale a entre 800 y 1 200 kg secos por cosecha. Esto se traduce en un ingreso de entre 300 y 420 USD por persona y por cosecha. Considerando un total de seis ciclos de cosechas al año, un acuicultor independiente puede llegar a percibir de su cultivo entre 2 000 y 2 500 USD anuales por su producción. Según datos del Observatorio Venezolano de Finanzas (www.observatoriodefianzas.org), el ingreso mínimo promedio en el Estado Nueva Esparta en el sector privado es de 162 USD mensuales en el primer trimestre del año de 2024.

Granjas acuícolas corporativas

Estas granjas están ubicadas exclusivamente en espacios regulados y concesionados a empresas privadas que cumplen con una serie de requisitos establecidos por las

CUADRO 2

Producción e ingresos de granjas de macroalgas independientes y corporativas en la República Bolivariana de Venezuela

Acuicultores independientes							
Localidad	Ubicación geográfica	Área cultivo (ha)	Número parcelas	Area parcelas (ha)	Cosecha/ parcela (Toneladas)	Producción/ cosecha (Toneladas)	Ingreso parcela/ cosecha (USD)
Pta. de Piedras	10° 54.295' N 64° 6.232' O	18	182	0,1	0,8–1,4	200,2	420–560
Atolladar	10° 54.770' N 64° 6.811' O	25	117	0,21	1,5–1,8	193,05	525–650
Capotillos	10° 53.769' N 64° 4.822' O	3	47	0,06	0,9–1,2	49,35	315–420
Total		46	346			393,39	
Granjas corporativas							
Tide	10° 52.237' N 64° 03.308' O	10	62	0,20	4,2	260,4	840
Biorma	10° 48.390' N 63° 57.584' O	1,5	30	0,05	0,75	22,5	150
Total		11,5	87			282,9	

autoridades competentes en pesca y acuicultura, medio ambiente y espacios acuáticos. Los cultivos son gestionados por grupos de personas residentes en las zonas cercanas, que actúan como granjeros asociados. Estos reciben capacitaciones para el buen manejo de sus parcelas y son los responsables de la producción. Se establecen días específicos para el pesado del producto cosechado, destinado a su comercialización en la playa. Las empresas proporcionan a los granjeros materiales, insumos, transporte y espacios para el almacenamiento. Todas las operaciones, incluido el secado y limpieza del material cosechado, son realizadas directamente por los productores. En el Cuadro 2 se describen la productividad e ingresos de algunas granjas acuícolas corporativas. En el momento de redactar este informe, se encontraban en operación tres empresas dedicadas al cultivo y comercialización de algas marinas en el Estado Nueva Esparta.

CONCLUSIONES

El reciente reinicio de las actividades de cultivo y comercialización, tras 18 años de pausa, ha abierto numerosas oportunidades, aunque también ha planteado varios desafíos. La producción de algas marinas en los últimos cinco años posiciona a la República Bolivariana de Venezuela como el principal productor de especies tropicales en la región. Su cultivo está generando una transformación significativa en algunas comunidades costeras, particularmente en el Estado Nueva Esparta, creando empleo directo a más de 600 personas, muchas de ellas en situación de pobreza extrema. Asimismo, existen zonas con vocación acuícola en varios estados costeros del país, como la península de Araya (Sucre), la península de Paraguaná (Falcón) y algunas localidades en el Estado Anzoátegui. Se estima un área de desarrollo potencial de más de 1 500 hectáreas y una producción anual de 60 000 toneladas de algas secas, equivalente a unas 15 000 toneladas de ficocoloides (agar y carragenina).

La República Bolivariana de Venezuela cuenta con un alto potencial para el procesamiento industrial de varios productos más allá de los ficocoloides, incluyendo el desarrollo de bioestimulantes (fitohormonas) para uso agrícola y la producción de materia prima como suplemento alimentario, con el objetivo de cubrir la demanda local y regional, generar empleo y divisas, combatir deficiencias nutricionales y, al mismo tiempo, respetar el medio ambiente. Todo ello solo será posible con un mayor apoyo institucional, la implicación de instituciones académicas y de investigación, y la disponibilidad de recursos humanos capacitados, incluida la participación directa de las comunidades costeras locales.

Por otra parte, existe un riesgo inherente, particularmente con *K. alvarezii*, ya que toda la biomasa producida en la República Bolivariana de Venezuela procede de la reproducción clonal o vegetativa de los 5 kg introducidos desde Filipinas en 1996. Recientemente, se ha reportado un bajo rendimiento en el contenido de carragenina a nivel industrial en las plantas donde se ha procesado el material de cultivo, posiblemente como consecuencia de un desgaste o deterioro de la calidad de los implantes, lo que ha influido negativamente en el precio de exportación del alga. Esto requiere medidas urgentes que incluyan un plan de mejora genético y la introducción de nuevas cepas y variedades certificadas.

Han pasado casi 40 años desde que se inició la maricultura de macroalgas en la República Bolivariana de Venezuela, y no fue hasta finales de 2023 cuando se adoptó un marco regulatorio mediante una resolución conjunta emitida de las instituciones involucradas. Esta nueva legislación establece las directrices generales para la operatividad de granjas acuícolas comerciales, la introducción de especies y la explotación de los bancos naturales, entre otros aspectos. Aunque supone un avance importante, aún quedan vacíos en cuanto al ordenamiento territorial para la acuicultura en zonas marino costeras y la incorporación de concesiones marinas a largo plazo, lo que contribuiría a la sostenibilidad del proyecto y a facilitar inversiones necesarias.

REFERENCIAS

- Ask, E.I. 1999. *Cottonii and Spinosum Cultivation Handbook*. FMC Food Ingredients Division, Philadelphia, 52 pp.
- Ask, E.I. y Azanza, R.V. 2002. Advances in cultivation technology of commercial euchematoid species: a review with suggestions for future research. *Aquaculture*, 206(3–4): 257–277. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00724-4](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00724-4)
- Cheney, D.P. 1988. *The genus Eucheuma J. Agardh in Florida and the Caribbean*. En: I.A. Abbott (Ed.), *Taxonomy of economic seaweeds with reference to some Pacific and Caribbean species* (Vol.2) California Sea Grant College Program, University of California, La Jolla, California, pp. 209–219.
- Dawes, C.P. 1996. *Suspended cultivation of Gracilaria in the sea*. *Journal of Applied Phycology*, 7: 303–313. <https://doi.org/10.1007/BF00004004>
- Doty, M.S. 1987. *The production and use of Eucheuma*. En: Doty, M.S.; Caddy, J.F. y Santelices, B. (eds.) *Case studies of seven commercial seaweed resources*. FAO Fisheries Technical Paper 281, Rome. pp. 123–161. <https://www.fao.org/4/x5819e/x5819e06.htm#the%20production%20and%20use%20of%20eucheuma>
- Foldats, E. 1980. Informe sobre la industrialización de algas agarofitas de la costa de la Península de Paraguaná. *Informe CONICIT*, 49 pp., 1 mapa.
- Foscarini, R. y Prakash, J. 1990. *Handbook on Eucheuma seaweed cultivation in Fiji*. South Pacific *Aquaculture Development Project*, FAO, Suva, Fiji. GCP/RAS/116/JPN. 42 pp. <https://www.fao.org/4/ac287e/AC287E00.htm>
- Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela**. N.º 42787. 2023. *Resolución conjunta Ministerio de Pesca y Acuicultura 023–23 y Ministerio para el Ecosocialismo 089 mediante la cual se regula el aprovechamiento, cultivo y actividades conexas de las especies de algas y cianobacterias para su desarrollo sustentable y sostenibilidad, en la República Bolivariana de Venezuela*. pp. 12–16. <https://www.gacetaoficial.io/venezuela/2023-12-28-gaceta-oficial-42787>
- Goés, H. y Reis, R.P. 2011. An initial comparison of tubular netting versus tie–tie methods of cultivation for *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Solieriaceae) on the south coast of Rio de Janeiro State, Brazil. *Journal of Applied Phycology*, 23: 607–613. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-010-9647-y>
- Gómez, A. 1996. Causas de la fertilidad marina en el nororiente de la República Bolivariana de Venezuela. *Interciencia*, 21(3): 140–146.

- Herrera, L. y Febres-Ortega, G. 1975. Procesos de surgencia y de renovación de agua en la Fosa de Cariaco del Mar Caribe. *Boletín Instituto Oceanográfico de Venezuela*, 14(1): 31–44.
- Montoya, E., Rosas, J.A., Rincones, R.E. y Narvaéz, J.L. 2020. Evaluación del crecimiento de *Eucheuma isiforme* (Rhodophyta, Gigartinales) en sistemas de cultivo suspendidos en la isla de Cubagua, República Bolivariana de Venezuela (sureste del Mar Caribe). *Aquatechnica*, 2(2): 85–97. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8276625>
- Msuya, F.E. 2011. The impact of seaweed farming on the socioeconomic status of coastal communities in Zanzibar, Tanzania. *World Aquaculture*, 42: 45–48. <https://marineagronomy.org/sites/default/files/seaweed%20in%20Tanzania.pdf>
- Neish, I.C. 2003. *The ABC of Eucheuma Seaplant Production Agronomy, Biology and Crop-handling of Betaphycus, Eucheuma and Kappaphycus the Gelatinae, Spinosum and Cottonii of Commerce*. Monograph # 1-0703 Surialink.
- Neish, I.C. 2008. *Good agronomic practices for Eucheuma and Kappaphycus seaplants: including an overview of basic biology*. SEAPlant.net Monograph no. HB2F 1008 V3 GAP.
- Racca, E., Hurtado, R., Dawes, C., Balladares, C. y Rubio, J.N. 1993. *Desarrollo de cultivo de Gracilarias en la Península de Araya (Venezuela)*. En: J. A. Zertuche González (Ed.), *Situación actual de la industria de macroalgas productoras de ficocoloides en América Latina y el Caribe* (pp. 33-38). [Proyecto AQUILA II, Documento de Campo No.13]. Roma: FAO. <https://www.fao.org/4/ab483s/AB483S05.htm>
- Rincones, R.E. 1990. *Experimental cultivation of an agarophyte algae: Gracilaria cornea (Rhodophyta, Gigartinales) in the Northwest coast of Venezuela*. Proceedings of the Workshop-Univ. S. Paulo/Int. Foundation for Science “Cultivation of Seaweeds in Latin America”. pp. 65–67 April 2–8, 1989. E.C. de Oliveira & N. Kautsky, eds.
- Rincones, R.E., Rubio, J.N. y Racca, E.C. 1992. *Commercial Cultivation of Gracilariopsis lemaneiformis in the Araya Peninsula, Venezuela*. En: Mshigeni K., Bolton, J., Critchley AT. y Kiangi, G. (coords.) *Proceedings of the workshop on the sustainable seaweed resources development in sub-Saharan Africa through the adoption of Aquaculture biotechnologies*. Pp. 55–67. Windhoek-Namibia.
- Rincones, R.E. y Rubio, J.N. 1999. Introduction and commercial cultivation of the red alga *Eucheuma* in Venezuela for the production of phycocolloids. *World Aquaculture*, 30(2): 58–63.
- Rincones, R.E. 2000. Marine agronomy: A sustainable alternative for coastal communities in developing countries. *Global Aquaculture Advocate*, 3: 70–72.
- Rodríguez de Ríos, N. 1965. Lista de algas macroscópicas de la bahía de Mochima (Venezuela). *Lagena*, 8: 41–50.
- Salazar, M.V. 2000. *Evaluación de algunos aspectos ecológicos en el cultivo del alga introducida Kappaphycus alvarezii (Doty) Doty en el sector La Uva, Isla de Coche, Estado Nueva Esparta Venezuela*. Tesis de grado para optar al título de Licenciado en Biología Marina, Escuela de Ciencias Aplicadas al Mar, Universidad de Oriente, Núcleo de Nueva Esparta, República Bolivariana de Venezuela pp. 111.
- Santelices, B. 1999. *A conceptual framework for marine agronomy*. *Hydrobiologia*, 398/399: 15–23. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-94-011-4449-0_3.pdf
- Smith, A.H. y Rincones, R.E. 2006. *Seaweed resources of the Caribbean*. En: Critchley A., Ohno M., Largo D. (eds). *World seaweed resources. DVD-ROM multimedia interactive software-UNESCO Publishing/ETI Bioinformatics*, University of the Netherlands, Amsterdam, The Netherlands. pp: 1–14.

Perspectiva antropológica del uso del maritorio en comunidades algueras

Francisco Araos

Universidad de Chile

Santiago, Chile

Araos, F. 2025. *Perspectiva antropológica del uso del maritorio en comunidades algueras*. En: Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Murúa Andrade, P. y Fariás Molina, A. (coords.). Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 24-26 de junio de 2024, Puerto Varas, Chile. *FAO Actas de Pesca y Acuicultura*. N.º 74. Roma, FAO. pp. 243-250.

RESUMEN

Este documento presenta una síntesis de diversos usos del maritorio por parte de comunidades algueras en Chile, desde los primeros habitantes de la costa del país hasta nuestros días. Se analizan los usos históricos de las macroalgas marinas a través de fuentes arqueológicas, etnohistóricas y etnográficas. Este trabajo incluye un caso específico sobre los grupos de recolectores de macroalgas de la zona central de Chile. A partir de estos antecedentes, se identifican dos innovaciones institucionales para el cuidado y protección de los modos de vida tradicionales del maritorio. Finalmente, se reflexiona sobre las presiones que sufren los maritorios tradicionales y los desafíos para su protección a largo plazo.

INTRODUCCIÓN

La importancia de las macroalgas marinas para las poblaciones costeras es un hecho ampliamente reconocido en la actualidad, aunque resulta difícil rastrear su relevancia en el desarrollo histórico de los grupos humanos que habitaron zonas costeras. Los cronistas de la época colonial demostraron poco interés en documentar el uso de este recurso por parte de la población indígena y mestiza, a pesar de que la recolección de macroalgas era una actividad común, tanto para el consumo directo como para el intercambio (Araos *et al.*, 2018).

Diversos estudios etnohistóricos y etnográficos han contribuido a la comprensión de las dimensiones humanas en la explotación de macroalgas (Rostworowski, 1981; Bittman, 1986; Masuda, 1986; Arrízaga, 1988; Recasens, 2003; Montecinos, 2005; Araos, 2006, 2015; Calderón y Morales, 2016; Guerrero, 2021; Guerrero y Araos, 2022). Estos trabajos demuestran la persistencia histórica de los modos de vida algueros en la costa chilena.

Esta actividad comprende, en general, tecnologías de recolección y prácticas de manejo del intermareal basadas en el conocimiento ecológico tradicional. Estas prácticas se han mantenido relativamente estables a pesar de la incorporación de los recolectores de macroalgas a la economía de mercado y el aumento de la demanda para fines industriales y de exportación.

No obstante, a pesar de la continuidad histórica en la explotación de macroalgas, las diversas amenazas que enfrenta el maritorio han debilitado su producción y los modos

de vida asociados. La sobreexplotación de algunas especies, las dificultades en el acceso a las áreas de recolección y las regulaciones que limitan las prácticas tradicionales de producción han dificultado la preservación de estos modos de vida. Frente a esto, han surgido innovaciones locales que buscan equilibrar la protección del maritorio con el desarrollo de nuevas prácticas productivas para la explotación de macroalgas, como los Espacios Costeros Marinos de Pueblos Originarios y los Refugios y Reservas Marinas.

Este trabajo examina los usos históricos de las macroalgas marinas en Chile y presenta un estudio de caso sobre los grupos de recolectores de macroalgas de la zona central del país. Además, analiza las innovaciones institucionales que protegen y proyectan los modos de vida tradicionales. Finalmente, reflexiona sobre las presiones que sufren los maritorios tradicionales y los desafíos para su protección a largo plazo.

Usos ancestrales de las macroalgas en Chile

Los estudios arqueológicos y antropológicos han documentado el uso histórico de las macroalgas. Las revisiones de la literatura especializada (Borie *et al.*, 2006; Araos *et al.*, 2018) permiten identificar los siguientes usos:

- **Alimenticio:** Diversos investigadores han sugerido el uso de macroalgas marinas como alimento al encontrar su presencia en conchales prehispánicos. En la costa norte de Chile, específicamente en la localidad de Pisagua, se han encontrado “conglomerados” de hojas secas y fragmentos de la macroalga *Macrocystis pyrifera* (Vidal, García y Vega, 2004).
- Otro hallazgo importante son los restos de cuatro especies de macroalgas marinas y cinco “masticables” de boldo, junco y alga, del sitio pleistocénico tardío de Monte Verde, en la Región de Los Lagos. Los restos de macroalgas identificadas corresponden a *Durvillea antarctica* (cochayuyo), *Porphyra columbina* (luche), *Gracilaria* sp. (pelillo) y *Sargassum* sp. (huiro). La distancia entre sus nichos de origen (entre 20 y 50 km del sitio) y su diferente disponibilidad estacional sugieren que estos recursos formaban parte de un amplio sistema de recolección para compensar deficiencias nutricionales específicas y escasez estacional de alimentos (Dillehay, 1989). Estudios más recientes en Monte Verde han identificado cinco nuevas especies de macroalgas marinas: *Gigartina* sp. (luga roja); *Mazzaella* sp. (luga cuchara); *Sarcothalia crispata* (luga negra); y *M. pyrifera*; además de *Trentepohlia* sp. Según los investigadores, estas evidencias sugieren que los grupos que habitaron el sur austral de Chile hace aproximadamente 14 000 años dependían considerablemente de los recursos costeros, específicamente de las macroalgas, tanto para su alimentación como para fines medicinales (Dillehay *et al.*, 2008).
- **Constructivo:** Este es uno de los usos frecuentes de macroalgas marinas en la literatura arqueológica. En estructuras habitacionales datadas hacia el año 2000 a.C., se describen pisos selladores de argamasa preparada con cenizas de macroalgas, que cubren la franja costera que se extiende entre Arica y Antofagasta (Núñez, Zlatar y Núñez, 1974; Bittman, 1982; Zlatar, 1983; Llagostera, 1993; Castro, Aldunate y Varela, 2012). En épocas más recientes, se ha documentado el uso de un “cemento” elaborado con cenizas de macroalga marina, agua y arena, empleado para sellar muros y pisos de los refugios costeros construidos en piedra por pescadores y pirquineros (Bittman, 1986).
- **Forraje y abono:** En el archipiélago de Chiloé, el uso de lamilla (*Ulva* sp.) y sargazo como fertilizante para cultivos agrícolas ha sido ampliamente documentado. Según Cárdenas (2005) en Chiloé: “con la práctica de la agricultura las macroalgas constituyeron la base en la fertilización de las tierras. Con la llegada de la primavera la lamilla se suelta de los fondos marinos y es arrojada a la orilla. También el sargazo varaba en las playas. Los chilotes extendían la macroalga en sus vegas, las entangaban, y podían apoyar esos suelos con los nutrientes que requerían”.

- **Usos medicinal y ritual:** En la colección Uhle depositada en el Museo Nacional de Historia Natural se encontraron cinco atados u ovillos pequeños de la macroalga *L. nigrescens*, que formaban parte del ajuar funerario de un enterratorio humano en Pisagua (1200 a 1600 d.C.) y que se cree que fueron utilizados como combustible, medicina o elemento ritual (Ramírez y Quevedo, 2000). En contextos etnográficos, se ha reportado el uso de macroalgas como remedio para inflamaciones oculares y enfermedades como la gota y el bocio. También ocupaban un lugar destacado como ingrediente culinario en festividades religiosas, donde se preparaban como “picante” y se servía en ceremonias relacionadas con el matrimonio, las faenas agrícolas, ritos como el relacionado con el corte de pelo, durante la festividad de la Cuaresma o el Día de Todos los Santos (Masuda, 1986; Bittman, 1986; Cárdenas, 2005).
- **Intercambio:** Las macroalgas fueron un recurso natural utilizado intensamente por los pueblos indígenas asentados en la costa (como los lafkenches, huilliches o los canoeros de la Patagonia) y los pueblos del interior. Esta dinámica generó importantes redes de intercambio e interacción entre la costa, valles y cordillera, cuyos rastros se observan hasta hoy en la zona sur de Chile (Masuda, 1986; Mösbach, 1999). En la costa norte, los grupos changos también aprovechaban las macroalgas marinas como bienes de intercambio (Castro, Aldunate y Varela, 2012), utilizándolas para obtener productos agrícolas, piezas de alfarería y textiles (Latcham, 1910).

El maritorio tradicional de los algueros: el caso de los mareros de la región de O'Higgins

La zona costera de la región de O'Higgins se localiza a unos 200 km al suroeste de Santiago. Está situada entre 33°51' y 35°01' de latitud sur, tiene una superficie de 3 295 km², y una población total de 41 160 habitantes, de los cuales más del 50 % reside en la zona rural (INE, 2017).

La zona costera se caracteriza por la presencia de ecosistemas de bahías, playas de roca y arena, y extensas praderas de macroalgas (Santelices, 1989). Entre estas últimas destacan las macroalgas pardas como: el huiro, el huiro calabacillo y el cochayuyo, así como macroalgas foliadas como la luga y la chasca.

El sector pesquero es exclusivamente artesanal. La recolección de macroalgas destaca entre las actividades pesqueras, siendo el recurso con mayor volumen de desembarque en la región. Esta actividad agrupa al 80 % de los pescadores artesanales bajo la categoría “recolector de algas” en el Registro Nacional de Pesca (SERNAPESCA, 2021).

La recolección de macroalgas se sustenta en una larga tradición cultural de explotación del intermareal, realizada por diversos grupos familiares de los poblados de Bucalemu, Pichilemu, Topocalma, Puertecillo, Matanzas y La Boca de Rapel. Los recolectores de macroalgas son denominados algueros o “mareros”, sus asentamientos “rucos” y el área de trabajo “la orilla” (Recasens, 2003; Araos, 2006, 2015; Guerrero, 2021; Guerrero y Araos, 2022). Los principales recursos que explotan son el cochayuyo, la luga y la chasca, el primero destinado a la alimentación directa, y los dos últimos como insumo para procesos industriales.

Un territorio habitado conlleva un significado vivenciado tanto en la biografía como en la vida social de las personas. Un espacio físico que, mediante un proceso de apropiación cultural, se transforma en un entorno de ocupación (Corbacho, 2005; Nogué, 2008). “La orilla” constituye el espacio litoral entre los cerros costeros y las rocas más alejadas que se adentran en el mar. En este territorio se han construido una veintena de asentamientos que, durante generaciones, han sostenido el trabajo de los algueros y su modo de vida recolector.

En este proceso de habitar el bordemar, han florecido saberes y prácticas culturales vinculadas al conocimiento ecológico del intermareal y sistemas tradicionales de

manejo de macroalgas, como las parcelas de cochayuyo (Guerrero y Araos, 2022). Estas prácticas han permitido delimitar y mantener un espacio de pertenencia, transformando “la orilla” en el maritorio de los algueros. Este territorio de cerros y acantilados está demarcado por numerosas huellas y senderos, creados por el constante movimiento de los algueros entre “los rucos”, caminos que van comunicando y ligando áreas de recolección, zonas de secado de cochayuyo, playas, áreas de caza y asentamientos (Araos, 2015).

La experiencia histórica y cotidiana de los algueros en el bordemar ha transformado este espacio natural en un territorio de vida y acción. Esta transformación surge de la exploración de la zona intermareal para la subsistencia, donde han creado huellas y estaciones, y posteriormente han consolidado asentamientos en diversos sitios del litoral. Se trata, por lo tanto, de un proceso de territorialización donde las comunidades plasman su forma de habitar y organizar el espacio marino (Haesbaert, 2023).

Innovaciones para la defensa y protección del maritorio tradicional: Espacios Costeros Marinos de Pueblos Originarios y los Refugios y Reservas Marinas

El reconocimiento legal de los modos de vida tradicionales y de las contribuciones de las personas a la protección de la naturaleza es una preocupación reciente. Históricamente ha predominado una visión excluyente de la protección de la biodiversidad, donde las comunidades son vistas como amenazas para la existencia y permanencia de especies y hábitats. Este modelo, aunque predominante, ha recibido numerosas críticas por las injusticias que provoca y su limitado éxito en la conservación a largo plazo. Esto ha llevado a revisar los paradigmas clásicos, incorporando perspectivas integradoras orientadas a la coexistencia entre seres humanos y naturaleza (Araos, 2017). Asimismo, la ambientalización de conflictos y luchas territoriales ha generado una apropiación social de las políticas y mecanismos de conservación, posicionando las áreas protegidas como recursos institucionales para ejercer derechos de ciudadanía y justicia ambiental. Este movimiento de apertura de la conservación ha encontrado en los modos de vida tradicionales y las estrategias de cuidado ejemplos valiosos que han impulsado nuevas formas de conservación de la naturaleza (Araos *et al.*, 2023a).

En el caso de la protección del maritorio, aunque formalmente la conservación marina se regula desde 1991 a través de la Ley de Pesca mediante la creación de Parques y Reservas Marinas, históricamente existían diversos mecanismos de protección y manejo de recursos basados en prácticas tradicionales de cuidado de bienes comunes. Las parcelas de cochayuyo de los mareros de la Región de O’Higgins (Guerrero y Araos, 2022), los corrales de pesca y viveros marinos del Archipiélago de Chiloé (Álvarez *et al.*, 2008), o los sitios tabúes en el territorio Kawéskar (Emperaire, 2002), son ejemplos documentados que demuestran una forma de cuidado del maritorio basada en las relaciones de reciprocidad entre los seres humanos y las diversas especies que habitan estas zonas (Ojeda *et al.*, 2022).

Este tipo de saberes y prácticas de cuidado se sustentan en vínculos ancestrales que conectan especies como las macroalgas con las poblaciones humanas que las han utilizado para su subsistencia desde milenios. No se trata de prácticas o saberes lineales ni estáticos; por el contrario, son formas diversas y dinámicas que constantemente actualizan habilidades, recursos y herramientas para mantener modos de vida particulares, incluso ante condiciones adversas que tienden a debilitarlos o limitarlos (Araos *et al.*, 2023a). En este apartado final, destacamos como mecanismo principal la acción estratégica de proteger legalmente estos modos de vida y sus especies asociadas mediante áreas protegidas de base local y comunitaria. En la experiencia chilena, identificamos dos arreglos institucionales relevantes: los Espacios Costeros Marinos de Pueblos Originarios (ECMPO) y los Refugios y Reservas Marinas asociadas a Áreas de Explotación y Manejo de Recursos Bentónicos (AMERB).

Los ECMPO son áreas delimitadas de la zona costera administradas por

comunidades indígenas, con el objetivo de proteger sus modos de vida y los ecosistemas que los sostienen. Funcionan como áreas protegidas que resguardan los sitios donde se realizan prácticas consuetudinarias, incluyendo usos productivos, religiosos, comunitarios y de conservación (Araos *et al.*, 2020). Los ECMPO están establecidos en la Ley 20.249 (2008), conocida como Ley Lafkenche, que otorga protección legal a nivel nacional a los usos consuetudinarios de los pueblos originarios de la costa chilena. Si bien inicialmente fue implementada en la región de Los Lagos, esta iniciativa se ha expandido gradualmente por todo el litoral del país (Araos *et al.*, 2023b). A través de la solicitud de ECMPO, las comunidades indígenas ejercen su derecho a proteger sus tradiciones y ecosistemas, proponiendo alternativas de conservación que incluyen la protección de humedales costeros, bosques de macroalgas, corales de aguas frías, bancos naturales, además del establecimiento de zonas de regeneración ecológica (Araos *et al.*, 2023a).

Por su parte, las AMERB son una figura administrativa de manejo entre la autoridad y los actores titulares de las áreas. Están orientadas al manejo para la cosecha, cultivo y extracción de recursos, otorgando derechos de uso exclusivo de pesca a organizaciones de pescadores (Gelcich *et al.*, 2010). Aprovechando el potencial conservacionista de las AMERB, se han desarrollado experiencias que conectan áreas de protección estricta (*no take zone*) con áreas de manejo explotadas y manejadas por sindicatos de pescadores (Gelcich *et al.*, 2012). El Santuario Marino Bosque de Calabacillo de Navidad es un ejemplo destacado. Esta área protegida, ubicada en la Región de O'Higgins dentro del territorio marero de la comuna de Navidad, se estableció en 2012 para proteger un bosque de *M. pyrifera* de 11 hectáreas situado entre dos AMERB. El santuario, administrado conjuntamente por el Municipio y los sindicatos de pescadores, funciona como refugio ecológico para especies explotadas por la pesca artesanal (Araos y Ferreira, 2013). Este modelo de conservación de base local y comunitaria se ha replicado en otras caletas de la zona central de Chile como Refugios y Reservas Marinas, donde el área *no take* se establece dentro del AMERB mediante acuerdos voluntarios entre los sindicatos y otras organizaciones interesadas (<https://www.capitalazul.cl/refugios-marinos>).

Bajo este marco, es posible entender a los ECMPO y las AMERB como Otras Medidas Efectivas de Conservación basadas en área (OMEC), un mecanismo de conservación que surge a partir de la implementación del Marco Mundial Kunming-Montreal de la Diversidad Biológica. Estos instrumentos contienen articulados legales orientados explícitamente a la conservación y representan innovaciones institucionales para el escenario de conservación en Chile.

Sin embargo, estas iniciativas innovadoras se ven fragilizadas por tres factores principales: los impactos de modelos de negocios insostenibles (*business as usual*), los procesos de transformación ambiental y las dinámicas políticas locales y nacionales. Entre las presiones más significativas se encuentran: la expansión de la especulación inmobiliaria en la zona central de Chile, que restringe el acceso al maritorio tradicional de los mareros de Cardenal Caro (Araos, 2015); la contaminación generada por la salmonicultura en la Patagonia y la consecuente pérdida de bancos naturales (Anbley-Evans *et al.*, 2024); y las mociones parlamentarias que buscan limitar la aplicación de los ECMPO.

CONCLUSIONES

El uso ancestral de macroalgas ha sido fundamental para el desarrollo de las comunidades costeras de Chile. Su marginalidad en los estudios arqueológicos y antropológicos responde más a sesgos disciplinares que a una falta de evidencia sobre su papel central en los procesos de ocupación marino-costera. Afortunadamente, nuevas investigaciones están comenzando a llenar ese vacío.

La relación de las comunidades con estos recursos se manifiesta en prácticas y conocimientos tradicionales arraigados en modos de vida específicos, fundamentados

en estrategias de cuidado de la naturaleza que han sostenido la vida en los maritorios. Sin caer en una visión simplista de las comunidades y sus intereses, la supervivencia milenaria de recolectores, especies y hábitats demuestra la capacidad humana para mantener modos de vida costeros que son tanto ambientalmente sostenibles como socialmente justos.

Estas formas tradicionales de habitar en el maritorio constituyen la base de arreglos institucionales que defienden legalmente la existencia y continuidad de las comunidades y sus modos de vida. Esto se logra mediante la protección de ecosistemas clave para la reproducción de especies en las AMERB o de los Usos Consuetudinarios de recolección y manejo colectivo en los ECMPO. Estas alternativas nos muestran caminos para enfrentar las múltiples crisis del antropoceno, aunque requieren un decidido apoyo estatal y el compromiso de todas las partes interesadas para su desarrollo efectivo.

REFERENCIAS

- Álvarez, A., Munita, D., Fredes, J. y Mera, M. 2008. *Corrales de pesca en Chiloé*. Imprenta América, Valdivia, Chile. <https://www.bibliotecanacionaldigital.gob.cl/visor/BND:585024>
- Anbleyth-Evans, J., Leiva, F.A., Gaymer, C.F., Abel, R.R.A., Campos, L. e Hidalgo, C. 2024. From a Brown to a blue economy in Chile. *Environmental Challenges*, 14: 100846. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100846>
- Araos, F., Catalán, E., Núñez, D., Riquelme, W., Cortínez, V., de Fina, D. y Anbleyth-Evans, J. 2023a. Cuidando la Patagonia Azul: Prácticas y estrategias de los pueblos originarios para curar las zonas marinas del sur de Chile. *The Journal of Latin American and Caribbean Anthropology*, 28(4): 286–297. <https://doi.org/10.1111/jlca.12695>
- Araos, F., Hidalgo, C., Brañas, F., Anbleyth-Evans, J., Diestre, F. e Iwama, A.Y. 2023b. Facing the blue Anthropocene in Patagonia by empowering indigenous peoples' action networks. *Marine Policy*, 147, 105397. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105397>
- Araos, F., Anbleyth-Evans, J., Riquelme, W., Hidalgo, C., Brañas, F., Catalán, E., Núñez, D. y Diestre, F. 2020. Marine indigenous areas: Conservation assemblages for sustainability in southern Chile. *Coastal Management*, 48(4): 289–307. <https://doi.org/10.1080/08920753.2020.1773212>
- Araos, F., Borie, C., Romo, M., Lira, N. y Duarte, A. 2018. Algas: breves antecedentes etnográficos y arqueológicos. *Revista Internacional de Estudio de las Tradiciones*, 1(2): 40–52. <http://revistafogon.cl/wp-content/uploads/2018/11/revista-fogon-VOL1-N2-julio-diciembre-2018.pdf>
- Araos, F. 2017. Más allá de la biodiversidad: aportes de la antropología a la conservación marina en Chile. *Revista Austral de Ciencias Sociales*, 33: 21–35. <https://doi.org/10.4206/rev.austral.cienc.soc.2017.n33-02>
- Araos, F. 2015. Habitando la orilla: La recolección de algas en el litoral central de Chile. *Espacio Regional Revista de Ciencias Sociales*, 2(12): 137–151. https://www.researchgate.net/profile/Francisco-Araos-2/publication/310451990_Habitando_la_Orilla_la_recoleccion_de_algas_en_el_litoral_central_de_Chile/links/582dac1508ae102f072d9b79/Habitando-la-Orilla-la-recoleccion-de-algas-en-el-litoral-central-de-Chile.pdf
- Araos, F. y Ferreira, L.C. 2013. The construction of an environmental arena for marine conservation in Chile. *Ambiente e Sociedade*, 16(3): 119–136. <http://dx.doi.org/10.1590/S1414-753X2013000300008>
- Araos, F. 2006. *Irse a la Orilla: Una aproximación etnográfica a los mareros de Cardenal Caro*. Memoria para optar al título de Antropólogo Social. Universidad de Chile. www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2006/araos_f/sources/araos_f.pdf

- Arrízaga, A.** 1988. *Recolección y utilización tradicional de los recursos marinos costeros de la región centro-sur de Chile (VIII a X región). Síntesis de su evolución.* Recursos naturales Andinos. Editado por S. Masuda, pp. 209–229. Universidad de Tokio, Tokio.
- Bittman, B.** 1986. *Recursos Naturales renovables de la costa del norte de Chile: Modos de obtención y usos.* Etnografía e historia del mundo andino. continuidad y cambio. Editado por S. Masuda, pp. 269–334. Universidad de Tokio, Tokio.
- Bittmann, B.** 1982. *El Proyecto Cobija: investigaciones antropológicas en la costa del Desierto de Atacama. Simposio Culturas Atacameñas. 44° Congreso Internacional de Americanistas.* 99–146. Manchester, Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte.
- Borie, C., Araos, F., Romo, M., Lira, N. y Duarte, A.** 2006. *Potencialidades, usos y evidencias de explotación de algas marinas. Antecedentes etnográficos y arqueológicos, implicancias y líneas de investigación.* XVII Congreso Chileno de Arqueología, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2006.
- Calderón, M. y Morales, C.** 2016. Etnografía del mercado de algas en Chile: transformaciones económicas y discursos en isla Apiao, Chiloé. *Alteridades*, 26(51): 109–122. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-70172016000100109&script=sci_arttext
- Cárdenas, R.** 2005. *Chiloé: botánica de la cotidianidad.* Santiago, Chile: Consejo Nacional del Libro y la Lectura.
- Castro, V., Aldunate, C. y Varela, V.** 2012. Paisajes culturales de Cobija, costa de Antofagasta, Chile. *Revista Chilena de Antropología*, (26). <https://revistadeantropologia.uchile.cl/index.php/RCA/article/view/26556>
- Corbacho, M.** 2005. *El Paisaje Percibido. Modelos de representación de la ensenada de Bolonia (Parque Natural del Estrecho de Gibraltar).* Actas del X Congreso de Antropología de España. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3777240>
- Dillehay, T.** 1989. *Monte Verde: a late Pleistocene settlement in Chile.* Paleoenvironment and site context. Smithsonian Institution Press, Washington, D.C.
- Dillehay, T.D., Ramírez, C., Pino, M., Collins, M.B., Rossen, J. y Pino-Navarro, J.D.** 2008. Monte Verde: Seaweed, food, medicine, and the peopling of South America. *Science*, 320(5477): 784–786. <https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.1156533>
- Emperaire, J.** 2002. *Los Nómades Del Mar.* Santiago: LOM Ediciones.
- Gelcich, S., Fernández, M., Godoy, N., Canepa, A., Prado, L. y Castilla, J.C.** 2012. Territorial user rights for fisheries as ancillary instruments for marine coastal conservation in Chile. *Conservation Biology*, 26(6): 1005–1015. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2012.01928.x>
- Gelcich, S., Hughes, T.P., Olsson, P., Folke, C., Defeo, O., Fernandez, M., Foale, S., Gunderson, L.H., Rodriguez-Sickert, C., Scheffer, M., Steneck, R.S. y Castilla, J.C.** 2010. *Navigating transformations in governance of Chilean marine coastal resources.* Proceedings of the National Academy of Sciences 107(39): 16794–9. <https://doi.org/10.1073/pnas.1012021107>
- Gobierno de Chile.** 2008. Ley 20.249. Crea el Espacio Costero Marino de los Pueblos Originarios. Santiago de Chile, Gobierno de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=269291>
- Guerrero, N.** 2021. *Algueros-mareros de Cardenal Caro: Conocimientos saberes locales y prácticas para el ordenamiento comunitario del maritorio en torno al manejo de la macroalga parda Cochayuyo (Durvillaea antarctica-incurvata) mediante el sistema de parcelas en la mar.* (Tesis de pregrado, Universidad Arcis). <https://es.scribd.com/document/556455645/tesina-arcis-ucdelmaule-natalia-guerrero-pena-15-683-572-2-final>
- Guerrero, N. y Araos, F.** 2022. *Parcelas de macroalgas pardas. Manejo comunitario del cochayuyo como praxis de agroforestería marina de los mareros de la zona central de Chile. La pesca en Chile. Miradas entrecruzadas.* Álvarez, R; Rebolledo, S.; Quiroz, D.; Torres, J. (eds.). pp. 271–297. Ministerio de las Culturas, Artes y el Patrimonio.
- Haesbaert, R.** 2023. Território. *Geographia*, 25(55). <https://periodicos.uff.br/geographia/article/view/61073/35707>

- Llagostera, A. 1993. Caza y pesca marítima (9000 a 1000 a.C.). *Culturas de Chile prehistoria, desde sus orígenes hasta los albores de la conquista*. Editado por J. Hidalgo, V. Schiappacasse, H. Niemeyer, C. Aldunate e I. Solimano, pp. 57–79. Editorial Andrés Bello, Santiago.
- Masuda, S. 1986. *Las algas en la etnografía andina de ayer y hoy. Etnografía e historia del mundo andino. continuidad y cambio*. Editado por S. Masuda, pp. 223–267. Universidad de Tokio, Tokio.
- Montecinos, S. 2005. *Consumo de algas y peces. Símbolos y marcas de identidad: Antropología de la alimentación en Chile*. Biodiversidad Marina: Valoración, Usos y Perspectivas. ¿Hacia dónde va Chile? Editado por E. Figueroa. Editorial Universitaria, Santiago. https://www.researchgate.net/profile/Antonio-Diaz-De-Leon/publication/282879502_Valoracion_uso_y_perspectivas_de_la_biodiversidad_marina_compartiendo_experiencias_entre_Mexico_y_Latinoamerica/links/574b88c608ae2e0dd301a80b/Valoracion-uso-y-perspectivas-de-la-biodiversidad-marina-compartiendo-experiencias-entre-Mexico-y-Latinoamerica.pdf
- Mösbach, E. 1999. *Botánica Indígena de Chile*. Editorial Andrés Bello, Santiago.
- Nogué, J. 2008. *Paisaje y Sentido de Lugar. Presentación Consejo de la Cultura de Galicia*. http://consellodacultura.org/files/2008/05/texto_nogue.pdf
- Núñez, L., Zlatar, V. y Núñez, P. 1974. “Caleta Huelén 42: una aldea temprana en el Norte de Chile (nota preliminar)”. *Hombre y Cultura*. Panamá: Universidad de Panamá.
- Ojeda, J., Salomon, A.K., Rowe, J.K. y Ban, N.C. 2022. *Reciprocal contributions between people and nature: a conceptual intervention*. *BioScience*, 72(10): 952–962. <https://doi.org/10.1093/biosci/biac053>
- Ramírez, M. y Quevedo, S. 2000. Hallazgo de *Lessonia Nigrescens* (Phaeophyceae) en enterratorio del cementerio Tiwanaco- Atacameño Pisagua (Colección Max Uhle). *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural*, 49: 99–108. <https://doi.org/10.54830/bmnhn.v49.2020.350>
- Recasens, A. 2003. *Pueblos de Mar: relatos etnográficos*. Santiago: Bravo y Allende editores.
- Rostworowski, M. 1981. *Recursos naturales renovables y pesca, siglos XVI y XVII*. Instituto de Estudios Peruanos, Lima.
- Vidal, A., García, M. y Vega, G. 2004. Trabajando con las plantas en la localidad arqueológica de Pisagua, I Región. *Boletín de la Sociedad Chilena de Arqueología*, 37: 49–59. <https://boletin.scha.cl/index.php/boletin/article/view/59>
- Zlatar, V. 1983. Replanteamiento sobre el problema Caleta Huelén 42. *Chungara*, 10: 21–28. <https://www.jstor.org/stable/27801763>

Aspectos socioeconómicos de acuicultores de macroalgas en pequeña escala en el Brasil

Marcella Araújo do Amaral Carneiro

*Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Natal, Brasil*

Araújo do Amaral Carneiro, M. 2025. *Aspectos socioeconómicos de acuicultores de macroalgas en pequeña escala en el Brasil*. En: Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Murúa Andrade, P. y Farías Molina, A. (coords.). Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 24-26 de junio de 2024, Puerto Varas, Chile. *FAO Actas de Pesca y Acuicultura*. N.º 74. Roma, FAO. pp. 251-257.

RESUMEN

Durante muchos años, la extracción de especies de los géneros *Gracilaria* e *Hypnea* de bancos naturales fue la principal fuente de comercialización de macroalgas en el Brasil. Esta actividad impulsó el desarrollo socioeconómico y el empoderamiento de las comunidades costeras de la región nordeste, especialmente entre mujeres y jóvenes. Sin embargo, la sobreexplotación y la ausencia de políticas de gestión adecuadas llevaron a una significativa disminución de estos recursos. Para contrarrestar los efectos de la extracción, se implementaron cultivos a pequeña escala en varias regiones del país, destacando el cultivo de *Gracilaria birdiae* en el nordeste y *Kappaphycus alvarezii* en el sudeste y sur. La acuicultura de macroalgas en el Brasil ofrece oportunidades para la generación de empleo y la sostenibilidad ambiental, principalmente en la producción de ficocoloides, biofertilizantes y bioestimulantes. Aunque los pequeños productores son fundamentales en este sector, se enfrentan a dificultades como una infraestructura deficiente, una legislación ambiental restrictiva, un acceso limitado a recursos financieros y tecnológicos, y precios bajos en el mercado. Para mejorar la situación socioeconómica de estos colectivos emergentes se necesitan políticas públicas que impulsen la economía circular y el desarrollo sostenible. Estas medidas asegurarán que los productores sigan contribuyendo a la economía y el bienestar de las comunidades costeras brasileñas, mientras fomentan prácticas acuícolas responsables y condiciones laborales dignas.

INTRODUCCIÓN

Cultivo de las principales especies de macroalgas en diferentes regiones del Brasil

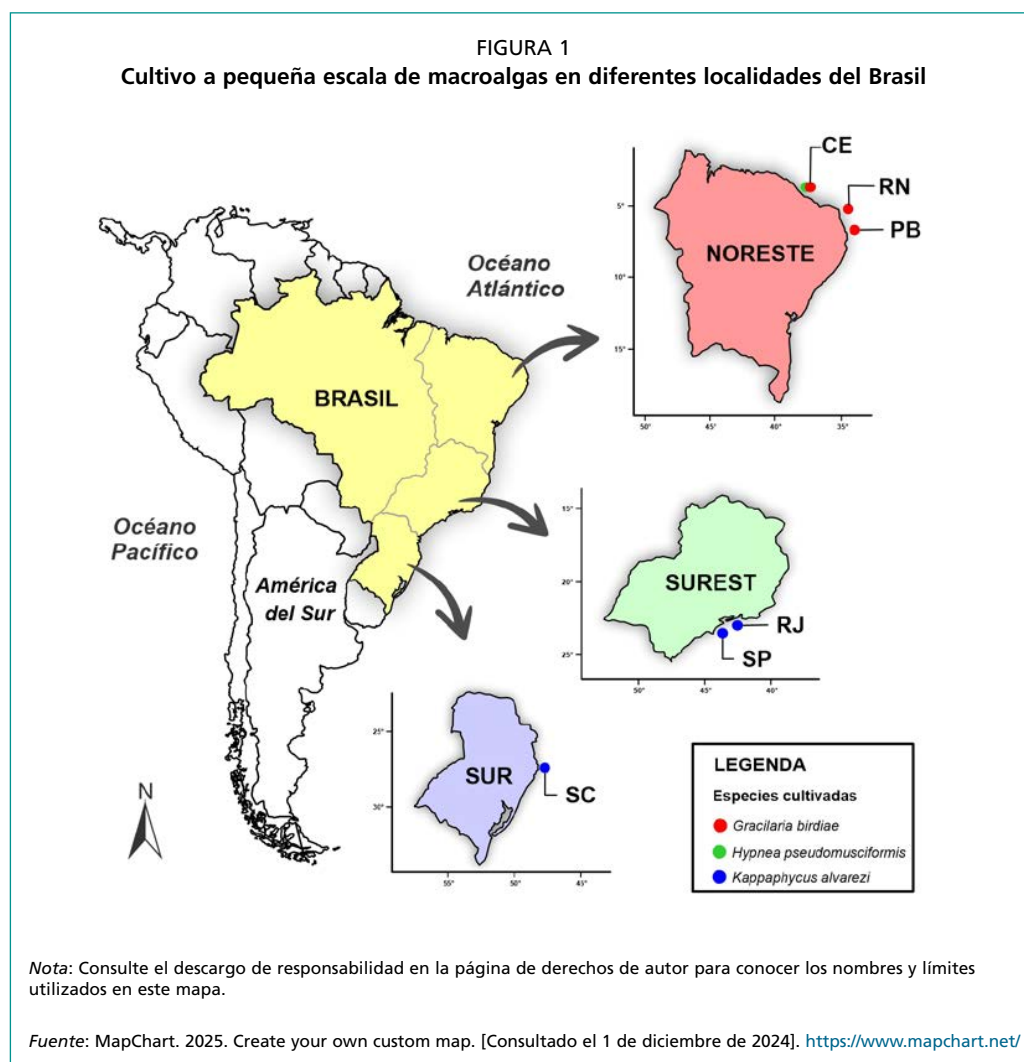
La industria de macroalgas en el Brasil comenzó en la década de 1960. En sus inicios, se basaba exclusivamente en la extracción de bancos naturales para obtener ficocoloides destinados a la industria local. Si bien el país cuenta con una gran riqueza de especies nativas con potencial económico, la explotación comercial se ha limitado a pocos géneros, principalmente *Gracilaria* e *Hypnea*. La recolección de macroalgas se convirtió en una importante fuente de sustento para las comunidades costeras del nordeste del Brasil, siendo una actividad familiar realizada principalmente por mujeres y jóvenes.

Esta actividad tuvo un papel destacado en las exportaciones de macroalgas del Brasil durante el siglo XX. Según Marinho-Soriano (2017), el país alcanzó su máxima producción en 1973–74, exportando aproximadamente 2 000 toneladas anuales al Japón (en peso seco). Sin embargo, entre 1977 y 1979 se produjo una drástica caída, reduciéndose las exportaciones anuales a solo 250 toneladas (en peso seco). La situación empeoró en 1981, cuando las exportaciones apenas alcanzaron 150 toneladas. En los años siguientes, la sobreexplotación excesiva y la falta de un programa de gestión adecuado provocaron el declive de las poblaciones en varias regiones, llevando la actividad al borde de la extinción. Como consecuencia, las empresas nacionales se vieron obligadas a interrumpir o reducir sus compras de macroalgas debido a la escasez de materia prima. Si bien la disminución de los bancos de *Gracilaria* fue evidente en varias zonas del nordeste, las causas exactas no están completamente determinadas. Sin embargo, factores como la sobreexplotación, los bajos precios, la competencia internacional y la ausencia de políticas socioeconómicas coherentes contribuyeron significativamente al declive de esta industria.

El cultivo de macroalgas en pequeña escala en algunas regiones del país surgió como una alternativa para proteger los lechos naturales de algas marinas de la sobreexplotación. Esta actividad generó un creciente interés debido a su potencial económico y medioambiental, pues prometía alcanzar altas producciones de biomasa mediante el cultivo y, al mismo tiempo, proteger los bancos naturales sobreexplotados. A través de una alianza entre el gobierno brasileño y la FAO, se establecieron nuevos incentivos para implementar y evaluar el cultivo experimental de *Gracilaria birdiae* en los Estados de Ceará, Rio Grande do Norte y Paraíba (Freddi y Aguilar-Manjarrez, 2005). Los resultados revelaron un alto potencial para el desarrollo de esta actividad (Bezerra y Marinho-Soriano, 2010). La consolidación de la acuicultura de *Gracilaria* no solo impulsó la valorización y comercialización de sus productos derivados, sino que también fomentó la creación de cooperativas de productores, prestando especial atención a la inserción de las mujeres en actividades productivas y organizativas (Freddi y Aguilar-Manjarrez, 2005; Ferreira, Carneiro y Marinho-Soriano, 2020). Aunque en algunas zonas la actividad se ha detenido por el agotamiento total de recursos, estudios recientes han demostrado resultados prometedores con el cultivo de *Hypnea pseudomusciformis* en comunidades costeras del Estado de Ceará, alcanzando una productividad de 0,64 kg/m en 45 días (Pereira, Kimpara y Valenti, 2020).

Las actividades de cultivo de macroalgas a pequeña escala se han desarrollado no solo en la región nordeste del Brasil, sino también en otros Estados del sudeste (São Paulo y Río de Janeiro) y sur (Santa Catarina) (Figura 1). En la región del sudeste, la falta de tecnología para desarrollar acuicultura con especies nativas productoras de carragenina impulsó la introducción de *Kappaphycus alvarezii*. El proceso de domesticación de esta especie comenzó en 1995–96 en la granja experimental del Instituto de Pesca de São Paulo, en Ubatuba (Gelli, Plastino y Yokoya, 2024). Según Gelli *et al.* (2020), el cultivo de esta especie, aún en etapas iniciales, enfrenta como principal desafío la restrictiva legislación ambiental regional. Además, la falta de acceso a recursos financieros y tecnológicos obstaculiza la mejora de la productividad y calidad de las macroalgas cultivadas. Los bajos precios ofrecidos por las industrias también han desmotivado a los productores, frenando así el desarrollo de esta actividad.

En el Estado de Río de Janeiro, los intentos de producir especies nativas, como *Hypnea musciformis*, no dieron como resultado una producción comercial significativa (Reis *et al.*, 2006). Para satisfacer las demandas del mercado de carragenano, la actividad acuícola se enfocó en la producción de *K. alvarezii*, que alcanzó una alta productividad (Castelar *et al.*, 2016). Entre 2004 y 2014, la alianza entre organismos estatales de investigación y pequeños productores impulsó significativamente el desarrollo de esta actividad. Sin embargo, a pesar de estos avances, actualmente solo unas pocas pequeñas empresas mantienen la producción de *K. alvarezii* en la región. Para garantizar la



continuidad de la actividad, los productores están explorando aplicaciones alternativas para la biomasa producida, como bioestimulantes y biofertilizantes agrícolas (Gelli *et al.*, 2020).

En la región sur del país, más específicamente en el Estado de Santa Catarina, también se inició el cultivo experimental de *K. alvarezii*. Las cepas, provenientes de cultivos en São Paulo, fueron sometidas a un largo proceso de domesticación y gestión de autorizaciones antes de iniciar el cultivo a escala comercial (Gobierno de Brasil, 2020). El Estado de Santa Catarina representa un área prometedora para la maricultura, ya que cuenta con una estructura social establecida en la producción de otros organismos marinos, principalmente moluscos. El cultivo de *K. alvarezii* ofrece dos beneficios principales: genera ingresos adicionales a los pequeños productores y contribuye a la biorremediación de áreas eutrofizadas por el cultivo de ostras (Hayashi *et al.*, 2011). Actualmente, los principales desafíos de esta actividad en la región son el mantenimiento de plántulas en invierno (Ventura *et al.*, 2020) y el proceso de secado al sol a gran escala (Faria, Hayashi y Monteiro, 2014).

A pesar de los numerosos beneficios, la acuicultura de macroalgas en el Brasil se enfrenta a importantes obstáculos para alcanzar su pleno potencial: desafíos tecnológicos como el suministro constante de plántulas, económicos como la falta de capital de inversión, y socioculturales como la persistente tradición de recolección (Marinho-Soriano, 2017).

Impactos ambientales y socioeconómicos del cultivo de macroalgas en el Brasil

La acuicultura de macroalgas está en aumento en el Brasil, ofreciendo importantes contribuciones a la creación de empleo y la sostenibilidad ambiental. Históricamente, el país ha cultivado macroalgas marinas para la extracción de ficocoloides como el agar y la carragenina, componentes esenciales en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica. La biomasa de *K. alvarezii* también ha cobrado relevancia en el sector agrícola, donde se procesa para producir biofertilizantes y bioestimulantes (Gelli *et al.*, 2020).

Las asociaciones y cooperativas que lideran estas iniciativas son fundamentales en la generación de ingresos y la estimulación del desarrollo socioeconómico de las poblaciones costeras. Los pequeños productores, que constituyen la mayoría del sector, operan a escala familiar utilizando métodos tradicionales adaptados a cada región. Esta actividad genera empleo local directo e indirecto, desde acuicultores hasta trabajadores estacionales para la recolección y procesamiento de macroalgas (Marinho-Soriano, 2017). La creciente producción y comercialización de macroalgas vitalizan la economía local al estimular el comercio y servicios relacionados. Con el respaldo de políticas gubernamentales adecuadas, el sector promueve la inclusión social y el empoderamiento de las comunidades costeras. Al ofrecer oportunidades laborales para grupos tradicionalmente marginados, especialmente mujeres y jóvenes, el cultivo y la comercialización de macroalgas fortalece la cohesión social y fomenta su participación activa en la economía (Ferreira *et al.*, 2021).

A pesar del potencial socioeconómico, la falta de infraestructura adecuada para el cultivo y procesamiento de macroalgas representa un desafío significativo para este sector. Los productores enfrentan dificultades para acceder a financiamiento y asistencia técnica necesarios para la modernización de equipos y técnicas de cultivo eficientes, además de enfrentar dificultades en la comercialización y la regulación. Esta situación genera bajos rendimientos y reduce su competitividad en el mercado. La competencia con grandes empresas y operaciones industriales que importan macroalgas a precios más bajos que los del mercado local. Esta dinámica no sólo disminuye el flujo de caja de los pequeños productores, sino que también compromete su sostenibilidad económica. En el ámbito social, los pequeños productores afrontan importantes desafíos que afectan sus condiciones laborales precarias y servicios básicos como salud y educación. La mayoría opera en condiciones de subsistencia, con ingresos mínimos del cultivo de macroalgas que apenas permiten mantener a sus familias.

Otro aspecto relevante es la vulnerabilidad de esta actividad ante eventos climáticos extremos, como tormentas y olas de calor, que pueden dañar las estructuras de cultivo y afectar el desempeño fisiológico de algunas especies de macroalgas (Chung, Sondak y Beardall, 2017). Sin embargo, aunque los escenarios climáticos futuros presentan desafíos para la biodiversidad marina (IPCC, 2022), una proyección reciente sobre la acuicultura de *G. birdiae* en el Brasil muestra perspectivas favorables (Barbosa-Silva *et al.*, 2023). La escasez de áreas aptas para el cultivo constituye uno de los principales obstáculos para la expansión de la acuicultura (Duarte *et al.*, 2017), pero el aumento de la temperatura del agua podría ampliar las regiones apropiadas para el cultivo de *G. birdiae*, incluyendo zonas del sudeste y sur del país que actualmente no son adecuadas. Dado que esta especie es más abundante en las regiones tropicales y está adaptada a altas temperaturas durante la mayor parte del año, es probable que esté mejor preparada para enfrentar un ambiente marino más cálido (Barbosa-Silva *et al.*, 2023).

A pesar de los desafíos, esta actividad juega un papel fundamental en la preservación de los ecosistemas marinos. La acuicultura de macroalgas genera diversos servicios ecosistémicos (Sultana *et al.*, 2023). Como productoras primarias y base de la cadena alimentaria, las macroalgas son cruciales para el secuestro de carbono y la absorción de nutrientes disueltos, contribuyendo a la biorremediación de ambientes eutróficos.

Los cultivos también proporcionan áreas de alimentación y refugio para larvas y juveniles de varias especies comerciales de peces e invertebrados.

En base a lo anterior, la acuicultura de macroalgas representa una valiosa oportunidad para alcanzar varias metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Figura 2). Estos incluyen: el suministro de alimentos y fertilizantes para la agricultura (ODS 2), las aplicaciones en medicina y biotecnología (ODS 3), la participación de las mujeres en actividades de cultivo y comercialización de productos derivados (ODS 5), la generación de ingresos y el crecimiento económico (ODS 8), apoyo a la economía costera y reducción de las desigualdades sociales (ODS 10), producción y aplicación responsable en bioproductos (ODS 12), mitigación de los impactos del cambio climático, como la eutrofización, la acidificación de los océanos y el secuestro de carbono (ODS 13) y conservación de la biodiversidad y sostenimiento del ecosistema marino (ODS 14) (Ferreira *et al.*, 2021).



CONCLUSIONES

Los pequeños productores juegan un papel fundamental en la acuicultura de macroalgas marinas en el Brasil, contribuyendo tanto a la sostenibilidad ambiental como al desarrollo socioeconómico de las comunidades costeras. Sin embargo, enfrentan diversos desafíos que deben resolverse para garantizar su resiliencia a largo plazo. La superación de las limitaciones socioeconómicas demanda la implementación de políticas públicas efectivas que fortalezcan y estimulen el desarrollo sostenible del sector. Estas políticas deben incluir inversiones en investigación para identificar especies nativas de alta productividad, facilitar el acceso a capacitación y transferencia tecnológica, y proporcionar financiamiento e infraestructura adecuados para responder a las demandas del mercado. Tales medidas permitirían consolidar la contribución de los pequeños productores de macroalgas a la economía del país.

REFERENCIAS

- Barbosa-Silva, M.S., Borburema, H.D., Fernandes, F.D.O., Nóbrega, M.F. y Marinho-Soriano, E. 2023. Projecting environmental suitability areas for the seaweed *Gracilaria birdiae* (Rhodophyta) in Brazil: Implications for the aquaculture pertaining to five environmentally crucial parameters. *Journal of Applied Phycology*, 35(2): 773–784. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-023-02920-5>
- Bezerra, A.F. y Marinho-Soriano, E. 2010. Cultivation of the red seaweed *Gracilaria birdiae* (Gracilariales, Rhodophyta) in tropical waters of northeast Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 34(12): 1813–1817. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.07.016>
- Gobierno de Brasil. 2020. *Instrução Normativa IBAMA no. 1, de 21 de janeiro de 2020. Diário Oficial da União. Brasília. 23 de janeiro de 2020. Seção 1, no. 16, p. 76.*

- Castelar, B., Reis, R.P., Azeredo, F., Mattos, P. y Berardinelli, G. 2016. *Hypnea musciformis*: alternative or complement to the production of *Kappaphycus alvarezii* introduced in tropical countries? *Aquaculture Research*, 47: 3538–3550. <https://doi.org/10.1111/are.12804>
- Chung, I.K., Sondak, C.F. y Beardall, J. 2017. The future of seaweed aquaculture in a rapidly changing world. *European Journal of Phycology*, 52(4): 495–505. <https://doi.org/10.1080/09670262.2017.1359678>
- Duarte, C.M., Wu, J., Xiao, X., Bruhn, A. y Krause-Jensen, D. 2017. Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation? *Frontier in Marine Science*, 4: 100. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00100>
- Faria, G.S.M., Hayashi, L. y Monteiro, A.R. 2014. Effect of drying temperature on carrageenan yield and quality of *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Solieriaceae) cultivated in Brazil. *Journal of Applied Phycology*, 26(2): 917–922. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-013-0172-7>
- Ferreira, A.B.G., Carneiro, M.A.A. y Marinho-Soriano, E. 2020. Saberes e práticas tradicionais na extração e cultivo de macroalgas marinhas. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 11(6): 661–671. <https://DOI.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.006.0053>
- Ferreira, A.B.G., Carneiro, M.A.A., Fernandes, F.O. y Marinho-Soriano, E. 2021. Evaluation of ecosystem services provided by farmed and wild seaweeds. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 12(6): 499–511, 2021. <https://DOI.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.006.0041>
- Freddi, A. y Aguilar-Manjarrez, J. 2005. Small-scale seaweed farming in North East Brazil. TCP/BRA/0065 35 *FAO Aquaculture Newsletter*, Roma, 34: 1–4. <https://www.fao.org/4/a0435e/A0435E16.htm>
- Gelli, V.C., Plastino, E.M. y Yokoya, N.S. 2024. *Cultivation and domestication of Kappaphycus alvarezii strains at Ubatuba Bay, São Paulo state, Southeastern Brazil*. En: Critchley, A.T., Hurtado, A.Q., Neish, I.C. (eds.) *Tropical Phyconomy Coalition Development*. Developments in Applied Phycology, Vol. 11. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47806-2_9
- Gelli, V.C., Patino, M.T.O., Rocha, J.V., Barbieri, E., Miranda-Filho, K.C. y Henriques, M.B. 2020. Production of the *Kappaphycus alvarezii* extract as a leaf biofertilizer: technical and economic analysis for the North coast of São Paulo-Brazil. *Boletim do Instituto de Pesca*, 46(2). <https://DOI.org/10.20950/1678-2305.2020.46.2.568>
- Hayashi, L., Santos, A.A., Faria, G.S., Nunes, B.G., Souza, M.S., Fonseca, A.L., Barreto, P.L.M., Oliveira, E.C. y Bouzon, Z.L. 2011. *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Areschougiaceae) cultivated in subtropical waters in Southern Brazil. *Journal of Applied Phycology*, 23: 337–343, 2011. <https://DOI.org/10.1007/s10811-010-9543-5>
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. En: H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.). *Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Marinho-Soriano, E. 2017. Historical context of commercial exploitation of seaweeds in Brazil. *Journal of Applied Phycology*, 29(2): 665–671. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-016-0866-8>
- Pereira, S.A., Kimpara, J.M. y Valenti, W.C. 2020. A simple substrate to produce the tropical epiphytic algae *Hypnea pseudomusciformis*. *Aquacultural Engineering*, 89: 102066. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102066>

- Reis, R.P., Caldeira, A.Q., Miranda, A.P.S. y Barros Barreto, M.B. 2006. Potencial para maricultura da carragenófita *Hypnea musciformis* (Wulfen) J.V. Lamour. (Gigartinales - Rhodophyta) na Ilha da Marambaia, Baía de Sepetiba, RJ, Brasil. *Acta Botânica Brasileira*, 20: 763–769. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062006000400002>
- Sultana, F., Wahab, M.A., Nahiduzzaman, M., Mohiuddin, M., Iqbal, M.Z., Shakil, A. y Asaduzzaman, M. 2023. Seaweed farming for food and nutritional security, climate change mitigation and adaptation, and women empowerment: A review. *Aquaculture and Fisheries*, 8(5): 463–480. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2022.09.001>
- Ventura, T.F.B., Bruzinga, C.P., Santos, A.A., Simioni, C. y Hayashi, L. 2020. Addition of carbon dioxide, followed by irradiance increase, as optimization strategy for the cultivation of the red seaweed *Kappaphycus alvarezii*. *Journal of Applied Phycology*, 32(6): 4113–4126. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-020-02210-4>

Cultivo de macroalgas tropicales en México: perspectiva económica, financiamiento y rentabilidad

Daniel Robledo¹, Roger Domínguez-May¹ y Germán Ponce-Díaz²

¹ *Cinvestav Unidad Mérida, Yucatán, México*

² *Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, La Paz, Baja California Sur, México*

Robledo, D., Domínguez-May, R. y Ponce-Díaz, G. 2025. *Cultivo de macroalgas tropicales en México: Perspectiva económica, financiamiento y rentabilidad*. En: Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Murúa Andrade, P. y Farías Molina, A. (coords.). Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 24-26 de junio de 2024, Puerto Varas, Chile. *FAO Actas de Pesca y Acuicultura*. N.º 74. Roma, FAO. pp. 259-270.

RESUMEN

Este informe analiza los aspectos económicos clave del cultivo de macroalgas tropicales en México. En particular, se centra en las macroalgas rojas de los géneros *Eucheuma* y *Kappaphycus*, conocidas colectivamente como Eucheumatoides, que constituyen la materia prima para la producción de algas secas, carragenina y fertilizantes agrícolas, productos con alto potencial de exportación e impacto económico. Actualmente, el desarrollo de cadenas de valor basadas en el cultivo de estas macroalgas está limitado por la falta de alternativas para valorizar otras especies tropicales, lo que restringe su capacidad de estimular las economías regionales a corto plazo. Entre los principales desafíos del sector destacan los costos de producción, la volatilidad de los precios, las barreras normativas y la funcionalidad de los productos derivados. Para lograr un desarrollo exitoso de estos mercados, será necesario reducir costos y mejorar la disponibilidad de las macroalgas; de lo contrario, su producción quedará relegada a nichos muy específicos. La diversificación y domesticación de especies nativas, combinadas con la integración de tecnologías y procesos locales, pueden ampliar las oportunidades de aprovechamiento y conversión de estas macroalgas en nuevos productos. Sin embargo, en América Latina y el Caribe aún existen pocos estudios sobre costos, rentabilidad y financiamiento del cultivo de macroalgas, lo que subraya la necesidad de estrategias para fomentar su desarrollo comercial.

INTRODUCCIÓN

Las macroalgas marinas son fuentes ricas en compuestos que han despertado gran interés por sus aplicaciones en sectores como el farmacéutico, el cosmético, el alimentario y el agrícola. Su amplia variedad de bioactivos contribuye a su creciente popularidad como recursos valiosos para la salud y el bienestar. Estos compuestos no solo benefician a la salud humana, sino que también ofrecen alternativas medioambientalmente sostenibles a las fuentes tradicionales de estos compuestos. Con el avance de la investigación, es probable que se amplíen las aplicaciones potenciales de las macroalgas marinas, abriendo camino a soluciones innovadoras para diversas industrias (Hermans, 2023).

El consumo mundial de macroalgas marinas en todo el mundo está cada vez más sujeto a una regulación específica y se requieren detalles sobre la composición química y las variaciones de una misma especie para obtener la autorización de su uso, especialmente como alimento humano. Las oportunidades de mercado a medio plazo se prevé que alcancen los 6 000 millones de USD en 2030 (Banco Mundial, 2023).

La industria de las macroalgas marinas en América Latina y el Caribe tiene un papel significativo a escala mundial, ya que el 17 % de todas las macroalgas marinas y el 37 % de las macroalgas rojas para la industria de los ficocoloides proceden de esta región (Bradford Burns, 1986).

El creciente interés por las materias primas derivadas de las macroalgas ha impulsado la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías de cultivo, especialmente en países con industrias emergentes, como México. Para aprovechar de manera óptima algunos de los recursos más valiosos de macroalgas rojas en América Latina y el Caribe, es fundamental contar con un conocimiento integral sobre su cultivo (Hayashi *et al.*, 2014). El desarrollo de esta industria deberá superar diversos desafíos en diferentes niveles, incluyendo la regulación normativa, la implementación de mejores prácticas para la cosecha, gestión y cultivo, así como la capacitación de recursos humanos para instruir a las comunidades involucradas. Estas mejoras permitirán transformar el aprovechamiento de las macroalgas en una actividad económicamente rentable que beneficie a las comunidades costeras (Rebours *et al.*, 2014). América Latina cuenta con un enorme potencial para contribuir significativamente a la producción mundial de macroalgas a medio y largo plazo. Sin embargo, este desarrollo requiere incentivos y financiación para garantizar una producción sostenible, además de la creación de mercados y canales de comercialización eficientes (Mendez *et al.*, 2023). Entre los principales desafíos del sector destacan los elevados costos de producción, la volatilidad de los precios, las barreras normativas y la funcionalidad de los productos derivados. Por ello, el crecimiento de estos mercados dependerá de mejoras sustanciales en la reducción de costos y la disponibilidad de las macroalgas; de lo contrario, su producción quedará relegada a nichos específicos.

Cultivo de macroalgas en México

En la actualidad, el cultivo de macroalgas marinas se ha expandido globalmente, contribuyendo a la seguridad alimentaria mundial, sosteniendo los medios de subsistencia rurales, reduciendo la pobreza y mejorando la salud de los océanos. En este sentido, América Latina y el Caribe muestra un gran potencial para el desarrollo de las actividades de cultivo de macroalgas marinas, con avances en nuevas cepas, metodologías de cultivo mejoradas, diversificación de especies, expansión del mercado y aumento de la demanda interna (Alemañ, Robledo y Hayashi, 2019). En particular, las costas mexicanas albergan una alta diversidad de macroalgas marinas, cuyo manejo ha permitido alcanzar una cosecha de poblaciones naturales de aproximadamente 6 668 toneladas húmedas en el último año reportado (CONAPESCA, 2021). El intercambio comercial de algas marinas en México generó ingresos de 7,18 millones de USD (Secretaría de Economía, 2024), evidenciando una demanda creciente de recursos algales que representa una oportunidad significativa para proyectos de inversión (Vázquez-Delfín *et al.*, 2019).

El cultivo de macroalgas ha ganado relevancia en América del Norte y Europa, atrayendo interés del sector público como del privado. Por ejemplo, la Unión Europea considera el cultivo de macroalgas como un pilar fundamental de su estrategia de economía azul (Hermans, 2023). Sin embargo, los volúmenes de producción en estas regiones apenas alcanzan los cientos de toneladas, con un crecimiento pausado. Del mismo modo, África y América Latina y el Caribe, pese a contar con un gran potencial en sus costas y Zonas Económicas Exclusivas para la producción de macroalgas, también muestran un crecimiento lento. La diversificación del uso de las macroalgas

marinas para usos alternativos podría impulsar nuevos mercados en los países de América Latina y el Caribe, que tradicionalmente han sido recolectores de algas y exportadores de biomasa más que cultivadores. Aun así, el éxito regional de estas iniciativas requiere estrategias de financiación y apoyo, tanto público como privado.

En las regiones tropicales de América Latina y el Caribe los géneros *Euclima* spp., *Gracilaria blodgettii*, *Gracilaria cornea* y *Hydropuntia crassissima*, propios del Atlántico tropical, han sido utilizados por las comunidades pesqueras durante al menos un siglo. Su uso se remonta a la colonización y a la migración inglesa en el Caribe (Robledo y Townsend, 2006). Sin embargo, en la actualidad, las opciones para valorizar las especies tropicales de macroalgas marinas siguen siendo limitadas, exceptuando las Euclimatoides, lo que dificulta el desarrollo de las economías regionales. En la península de Yucatán, la introducción del cultivo de macroalgas marinas comenzó en el año 2000 a través del Programa de Empleo Temporal (PET), con el objetivo de reducir la presión sobre las pesquerías tradicionales. En el estado de Yucatán, las especies acuáticas cultivadas se dividen en tres categorías: (i) organismos de cultivo generalizado (acuicultura comercial), que contribuyen a la oferta alimentaria, generan empleos y aportan divisas; (ii) especies producidas a menor escala (acuicultura de fomento), con potencial de expansión o en fase de prueba y transferencia tecnológica; y (iii) especies marinas, con alto valor comercial o demanda creciente, cuyo desarrollo depende del avance tecnológico y de su viabilidad económica. Dentro de esta última categoría se encuentra el alga *Kappaphycus alvarezii*, que representa una oportunidad para impulsar el cultivo comercial mediante la innovación tecnológica (Flores-Nava *et al.*, 2016).

En México, la extracción de macroalgas marinas está regulada por un plan de manejo detallado en el Diario Oficial de la Federación que incluye exclusivamente las especies de bosques naturales en la península de Baja California (DOF, 2012). Actualmente existen esfuerzos para incluir las especies pelágicas de *Sargassum* que desde 2014 inundan las costas del Caribe mexicano (A. Suárez, comunicación personal, 2024). La Carta Nacional Pesquera no contempla muchos de los recursos algales que se cosechan de manera natural y parece no haber sido actualizada recientemente (CNP, 2023). En México, a pesar de la diversidad de especies de macroalgas marinas y su alto potencial productivo, así como de la experiencia acumulada en investigación, su cultivo ha quedado rezagado en comparación con los esfuerzos de apoyo y gestión destinados a otros recursos marinos. De hecho, las macroalgas no son consideradas una prioridad en la mayoría de las iniciativas para el desarrollo de cultivos marinos (Programa Nacional de Pesca y Acuicultura, 2020-2024). Actualmente, la Comisión Nacional de Pesca y Acuicultura (CONAPESCA) solo reconoce cinco especies para potenciar la acuicultura de fomento: el alga verde *Ulva clathrata*, las macroalgas pardas *Eisenia arborea* y *Macrocystis pyrifera*, y el alga roja *Gracilaria pacifica*. Sin embargo, su distribución geográfica está restringida a los estados de la costa del Pacífico, específicamente en la península de Baja California y Sinaloa, regiones de clima templado y subtropical, en el caso de *U. clathrata*. No se contempla ninguna especie de la costa del Atlántico, Golfo de México ni el Mar Caribe, a pesar de la presencia de macroalgas rojas tropicales con alto potencial para el cultivo y el aprovechamiento comercial. Por otro lado, la acuicultura comercial de macroalgas en México sigue siendo incipiente. Actualmente, solo dos empresas operan a pequeña escala, aunque con perspectivas prometedoras:

- Productos Marinos de las Californias (PMC) cultiva *Ulva ohnoi* para su uso alimentario directo, con una producción anual de 120 toneladas en peso húmedo, aunque estas cifras aún no se reflejan en las estadísticas de CONAPESCA.
- Algamar se especializa en el cultivo de *M. pyrifera* y, en menor medida, *E. arborea*, destinadas a la producción de bioestimulantes y otros productos, incluyendo cosméticos.

Además, la empresa estadounidense Blue Ocean Barns ha iniciado un proyecto experimental para cultivar *Aspargopsis* en sistemas de estanques similares a los utilizados por PMC para el cultivo de *U. ohnoi*. Este tipo de iniciativas podrían abrir nuevas oportunidades para la expansión del cultivo de macroalgas en México.

En términos de impacto social, es importante contextualizar la relevancia de la población pesquera y acuícola del país. Según el Programa Nacional de Pesca y Acuicultura, la península de Baja California registra aproximadamente 16 802 individuos, de los cuales solo el 15 % en Baja California y el 1,9 % en Baja California Sur son acuicultores. Estas cifras evidencian el bajo porcentaje de población dedicada al sector acuícola en el país. Esta situación es aún más notable en Yucatán, donde de una población pesquera de 14 491 personas, solo el 4,6 % se dedica a la acuicultura, principalmente de especies dulceacuícolas. Por lo tanto, la diversificación de la acuicultura como actividad alternativa o complementaria a la pesca cobra especial relevancia en regiones con alta población pesquera, bajos ingresos o recursos pesqueros sobrexplotados. Por ello, al igual que en otras regiones, la acuicultura de macroalgas, considerada de bajo impacto ambiental y mínima tecnificación, se presenta como una opción viable para su desarrollo e inclusión en las políticas públicas orientadas a la generación de riqueza y alternativas alimentarias.

En la península de Yucatán, durante los últimos 20 años se ha desarrollado el cultivo experimental de macroalgas rojas como *Eucheuma isiforme*, *Solieria filiformis*, *Halymenia floresii* y *K. alvarezii*, las cuales representan fuentes potenciales de materia prima para la producción de carragenina. Este producto, un hidrocoloide utilizado como espesante y estabilizante en la industria alimentaria y farmacéutica, tiene un mercado mundial anual de alrededor de 450 millones de USD. En 2008, México exportó entre 300 y 400 toneladas de materias primas cosechadas para las industrias de carragenina de todo el mundo, mientras que la demanda de carragenina en el país alcanzó las 4 400 toneladas métricas (Robledo y Freile-Pelegrín, 2011). La expansión de la industria de macroalgas marinas en esta región depende del acceso a la materia prima, el desarrollo de productos y la implementación de técnicas de cultivo adecuadas para la producción de biomasa. La diversificación en el uso de estas especies tropicales va más allá de la extracción de hidrocoloides. Se han explorado aplicaciones alternativas como el consumo humano directo, aprovechando el potencial nutracéutico de especies como *S. filiformis* y *G. cornea* (Zepeda, Freile-Pelegrín y Robledo, 2020), así como la extracción de compuestos bioactivos para aplicaciones farmacéuticas y cosméticas de especies como *H. floresii* y *Rhodymenia pseudopalmata* (Peñuela *et al.*, 2018; Pliego-Cortés *et al.*, 2019; Jousselin *et al.*, 2023). Estas aplicaciones podrían dinamizar al uso de las especies tropicales evaluadas. No obstante, esto requiere directrices bioeconómicas y modelos de proyección para una maricultura rentable, responsable y bien gestionada que garantice un suministro regular de materia prima, capaz de satisfacer y mantener los volúmenes y calidades requeridos.

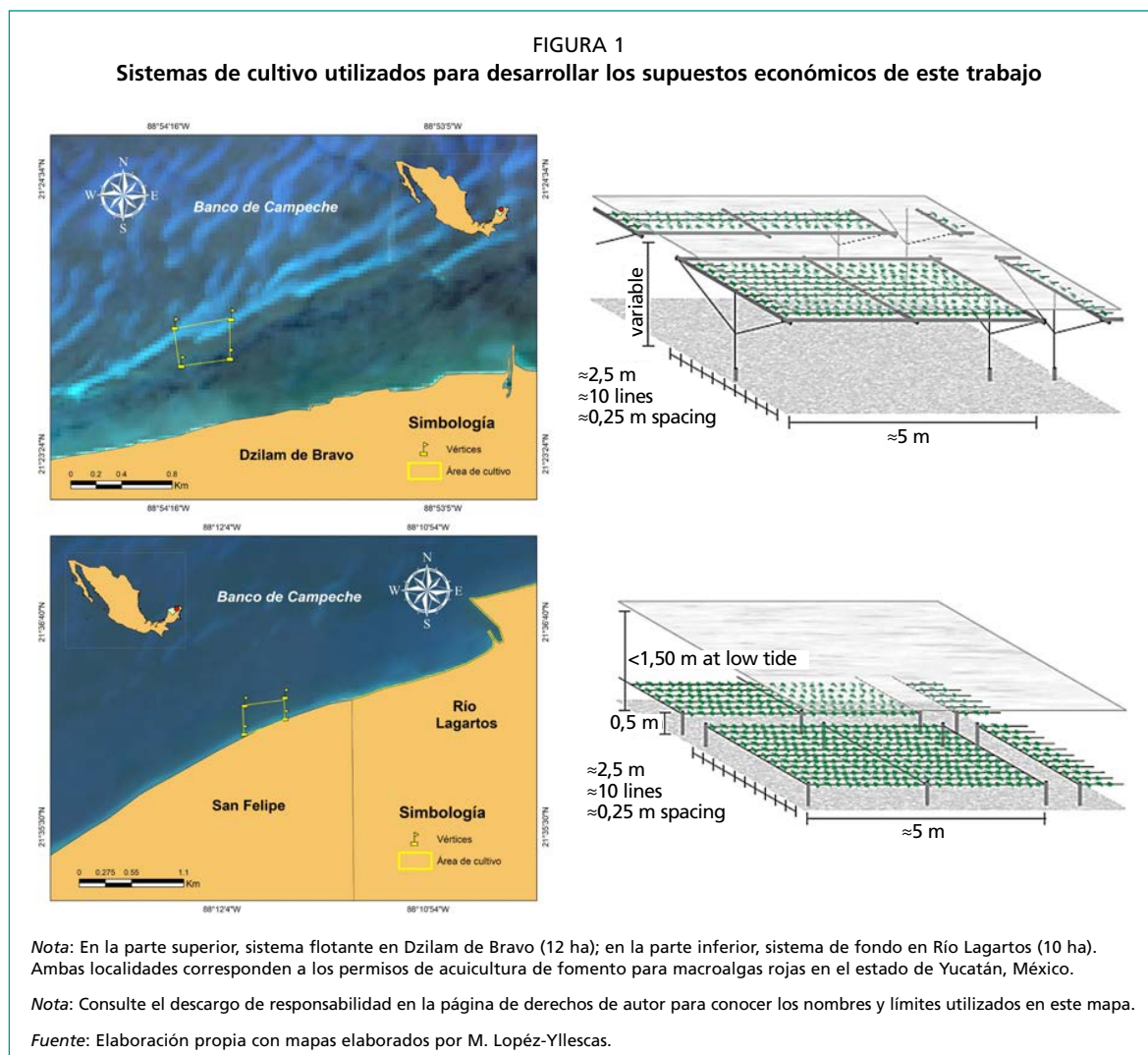
El cultivo de algunas de estas especies, particularmente de *K. alvarezii*, ha demostrado ser técnicamente viable como una alternativa de maricultura en la Península de Yucatán (Muñoz, Freile-Pelegrín y Robledo, 2004), especialmente durante las estaciones seca y húmeda, cuando el sector pesquero principal está inactivo. Las tasas de crecimiento de esta especie en la zona son notables, superando el 8 % por día, mostrando un crecimiento exponencial entre abril y junio, con un aumento de peso decuplicado tras 30 días de cultivo. Un proyecto de gestión comunitaria de recursos costeros en zonas protegidas ha analizado el potencial socioeconómico del cultivo de macroalgas como alternativa a la pesca artesanal (Robledo y Townsend, 2006). Sin embargo, hasta la fecha no se han establecido explotaciones comerciales, a pesar de que el rendimiento de la biomasa producida oscila entre el 32 % y el 41 %. Las principales limitaciones incluyen la gestión del tiempo de cosecha y el dominio asiático del mercado de la carragenina, factores que afectan significativamente la viabilidad económica (Valderrama *et al.*,

2015; Domínguez-May, Gasca-Leyva y Robledo, 2017). El escalamiento de los cultivos en la zona requiere nuevos esfuerzos técnicos y financieros. Esta actividad podría generar beneficios socioeconómicos significativos si se planifica de manera sostenible, incorporando innovación y desarrollo de productos locales para establecer cadenas de valor que no dependan exclusivamente de materia prima.

Robledo, Gasca-Leyva y Fraga (2013) evaluaron la viabilidad económica del cultivo de macroalgas utilizando datos del cultivo piloto en Yucatán, considerando los precios del mercado internacional. El estudio concluyó que la integración e industrialización de algas en México depende fundamentalmente del interés conjunto de la industria, de los inversionistas locales y de las autoridades gubernamentales. Basado en la experiencia de Dzilam de Bravo, este trabajo presenta un nuevo análisis de factibilidad económica para el cultivo de macroalgas marinas tropicales en México, evaluando dos sistemas de cultivo tradicionales, de fondo y flotante, como componentes de las estrategias de subsistencia para el desarrollo costero comunitario.

Supuestos de este trabajo

Todo análisis bioeconómico requiere diversos supuestos: biológicos, económicos, técnicos, de población y mercado objetivo, variaciones estacionales de producción, y costos de exportación o distribución a los mercados demandantes de biomasa cultivada (Domínguez-May, Hernández y Velázquez-Abunader, 2024). Para este estudio sobre el cultivo de macroalgas tropicales en México, se han considerado datos de crecimiento del cultivo piloto de la especie *K. alvarezii* para el mercado de carrageninas, comparando dos sistemas de cultivo, fondo y flotante (Figura 1), y evaluando los costos de



operación y exportación de la biomasa FOB (del inglés Free On Board, libre a bordo, término comercial internacional para mercancías transportadas por barco hasta un puerto de carga convenido) hacia Indonesia y Chile. Los ciclos de cultivo se establecen en 60 días, periodo en que las plantas alcanzan más de 1 kg de peso fresco, aunque la práctica comercial contempla ciclos de 30 o 45 días. La recolección se realiza con cuchillos de acero inoxidable o navajas, utilizando cajas de plástico en la embarcación. El secado se efectúa en bancos de madera de 1 × 5 m² sobre redes de malla de 2 mm para evitar contaminación por arena y tierra. Este proceso reduce la humedad hasta en un 70 % y dura entre uno o tres días, dependiendo de la época. Posteriormente, las algas se empacan en sacos de yute o plástico para su transporte en contenedores hacia las instalaciones de transformación en los países mencionados, ambos con capacidad y demanda para procesar esta biomasa.

Análisis de factibilidad del cultivo de macroalgas marinas en México

El Cuadro 1 muestra los costos totales de inversión para los dos tipos de cultivo de macroalgas marinas. El sistema de fondo requiere una inversión de USD 14 377, mientras que el sistema flotante necesita USD 34 347, siendo este último un 139 % más costoso. La infraestructura básica de la granja (estacas, cuerdas, pesos, flotadores, balsas) (Figura 1), representa el principal costo de inversión: 72 % para el cultivo de fondo y 88 % para el sistema flotante. La construcción del sistema flotante supera los 19 970 USD por hectárea al sistema de fondo. El resto de los costos de capital se distribuye entre vehículos (embarcaciones), insumos y equipos diversos (cuchillos, cajas de plástico, balanzas) e instalaciones de secado.

Los datos y supuestos técnicos y económicos sobre los costos de operación del cultivo de macroalgas en México se presentan en el Cuadro 2. Las siembras iniciales utilizan talos de 50 g, mientras que los ciclos subsecuentes emplean talos de 100 g. Para el análisis de factibilidad técnica-económica se utilizaron inóculos de 50 g y 100 g, con tasas de crecimiento promedio de 5,6 % y 5,4 % por día, respectivamente (Robledo,

CUADRO 1

Datos y supuestos del análisis económico del cultivo de macroalgas *Euchematoides* en México

Inversión	Valor (USD)	Depreciación (USD)
Sistema de fondo		
Estacas	2 003	401
Monofilamentos	1 580	316
Red de protección	6 770	1 354
Costos del cultivo	10 352	2 070
Embarcación	1 128	226
Equipo de uso en tierra	2 897	579
Vehículos, equipo e instalaciones	4 025	805
INVERSIÓN TOTAL	14 377	2 875
Sistema flotante		
Cuerda de polipropileno	15 232	3 046
Boyas Flotantes	987	197
Pesos	5 641	1 128
Red de protección	6 770	1 354
Bambú (jimbas)	1 692	338
Costos del cultivo	30 323	6 065
Embarcación	1 128	226
Equipo de uso en tierra	2 897	579
Vehículos, equipo e instalaciones	4 025	805
INVERSIÓN TOTAL	34 347	6 869

CUADRO 2

Datos, supuestos técnicos y económicos del cultivo de macroalgas Eucheumatoides en México

Parámetros	Unidades	Valor
Parámetros técnicos		
Ciclo de cultivo	días	60
Ciclos por año	4	Ciclos/año
Número de talos inicial	22 400	Unidades/ciclo
Tasa de mortalidad	10	%/ciclo
Tasa de crecimiento promedio de los talos de 50 g	5,6	%/ciclo
Tasa de crecimiento promedio de los talos de 100 g	5,4	%/ciclo
Tasa de crecimiento máximo de los talos de 50 g	7,8	%/ciclo
Tasa de crecimiento máximo de los talos de 100 g	7,8	%/ciclo
Tasa de crecimiento mínimo de los talos de 50 g	4	%/ciclo
Tasa de crecimiento mínimo de los talos de 100 g	4	%/ciclo
Costos		
Talos de 50 g	0,08	USD/unidad
Talos de 100 g	0,16	USD/unidad
Siembra	56	USD/ciclo
Costos		
Cosecha y secado	674	USD/ciclo
Mantenimiento y Cuidado	1 348	USD/ciclo
Renta	1 580	USD/ciclo
Comercialización Indonesia	4 299	USD/ciclo
Comercialización Chile	3 689	USD/ciclo
Precio		
Precio FOB Indonesia	1,3	USD/peso seco/kg
Precio FOB Chile	1,5	USD/peso seco/kg
Tasa de descuento anual	6	%

Gasca-Leyva y Fraga, 2013). El análisis también incluyó las tasas máximas y mínimas de crecimiento registradas: 7 % y 4 % por día, respectivamente. Los costos unitarios de las semillas fueron de USD 0,08 por pieza para talos de 50 g y USD 0,16 para los de 100 g. El costo de mano de obra asciende aproximadamente a USD 2 078 por ciclo, distribuido de la siguiente manera: 65 % para tres empleados a tiempo completo que realizan el mantenimiento y cuidado rutinario, 32 % para cosecha y secado, y 3 % para siembra. El alquiler de una propiedad en tierra para servicios generales (secado y almacenamiento de equipos y materiales) cuesta USD 1 580 al año. Los costos de comercialización, que incluyen empaque y envío, son de USD 4 299 por ciclo para Indonesia y USD 3 689 por ciclo para Chile.

Ingreso, costo y beneficio

Con cuatro ciclos de producción anuales y 22 400 unidades de semillas por cada ciclo de cultivo (50 g en siembra inicial y 100 g para siembras subsecuentes), se obtiene una producción de 51 toneladas de algas secas por año. Considerando precios FOB de USD 1 300 por tonelada para Indonesia y USD 1 500 por tonelada para Chile, se analizaron los ingresos, costes y beneficios de los diferentes sistemas de cultivo, resumidos en el Cuadro 3 para la tasa de crecimiento promedio. Los Cuadros 4 y 5 muestran los resultados para las tasas máximas y mínimas de crecimiento. La biomasa seca generada fue de 51, 192 y 22 toneladas para las tasas de crecimiento promedio, máximo y mínimo, respectivamente, en ambos sistemas de cultivo.

El sistema de fondo genera mayores beneficios que el sistema flotante, tanto con precios FOB en Indonesia como en Chile. Esto se debe principalmente a su menor

CUADRO 3
Resultados económicos del cultivo de macroalgas Eucheumatoides, considerando una tasa de crecimiento promedio

Parámetros	Fondo		Flotante	
	Precio FOB Indonesia	Precio FOB Chile	Precio FOB Indonesia	Precio FOB Chile
Ciclo de cultivo (días)	60	60	60	60
Biomasa Seca (t)	51	51	51	51
Ingreso por venta (USD)	65 686	75 791	65 686	75 791
Costo de la semilla (USD)	3 665	3,665	3 665	3 665
Costo de la rafia e hilo alquitranado (USD)	188	188	188	188
Costo de siembra (USD)	56	56	56	56
Costo mantenimiento y vigilancia (USD)	1 348	1 348	1 348	1 348
Costo de cosecha/secado (USD)	674	674	674	674
Costo variable (USD)	5 931	5 931	5 931	5 931
Depreciación (USD)	2 875	2 875	6 869	6 869
Renta (USD)	1 580	1 580	1 580	1 580
Costo fijo (USD)	4 455	4 455	8 449	8 449
Costo total (USD)	10 386	10 386	14 380	14 380
Costo de sacos de polietileno (USD)	2 571	2 571	2 571	2 571
Costo de transporte (USD)	14 623	12 186	14 623	12 186
Costos de comercialización (USD)	17 194	14 757	17 194	14 757
Ingreso Neto (USD)	39 341	49 446	35 346	45 452
VPN (5 años, 6 %) (USD)	78 913	131 747	42 117	94 951
TIR (5 años) (%)	153	241	44	85
Recuperación de la inversión (años)	1	1	2	3
B/C	1,6	2,0	0,7	0,9
Ratio del beneficio neto (%)	60	65	48	60
Precio de equilibrio por encima del costo (USD/t)	206	206	680	680
Producción de equilibrio por encima del costo total (t)	8	8	11	11

CUADRO 4
Resultados económicos del cultivo de macroalgas Eucheumatoides, considerando tasa de crecimiento máximo

Parámetros	Fondo		Flotante	
	Precio FOB Indonesia	Precio FOB Chile	Precio FOB Indonesia	Precio FOB Chile
Ciclo de cultivo (días)	60	60	60	60
Biomasa Seca (t)	192	192	192	192
Ingreso por venta (USD)	249 315	287 671	249 315	287 671
Costo de la semilla (USD)	3 665	3 665	3 665	3 665
Costo de la rafia e hilo alquitranado (USD)	188	188	188	188
Costo de siembra (USD)	56	56	56	56
Costo mantenimiento y vigilancia (USD)	1 348	1 348	1 348	1 348
Costo de cosecha/secado (USD)	674	674	674	674
Costo variable (USD)	5 931	5 931	5 931	5 931
Depreciación (USD)	2 875	2 875	6 869	6 869
Renta (USD)	1 580	1 580	1 580	1 580
Costo fijo (USD)	4 455	4 455	8 449	8 449
Costo total (USD)	10 386	10 386	14 380	14 380
Costo de sacos de polietileno (USD)	9 759	9 759	9 759	9 759
Costo de transporte (USD)	55 502	46 252	55 502	46 252
Costos de comercialización (USD)	65 261	56 011	65 261	56 011
Ingreso Neto (USD)	222 970	261 326	218 976	257 332

CUADRO 4 (CONTINUACIÓN)

Parámetros	Fondo		Flotante	
	Precio FOB Indonesia	Precio FOB Chile	Precio FOB Indonesia	Precio FOB Chile
VPN (5 años, 6 %) (USD)	649 950	850 487	613 155	813 691
TIR (5 años) (%)	1 097	1 428	447	586
Recuperación de la inversión (años)	1	1	2	3
B/C	9,0	10,6	4,5	5,3
Ratio del beneficio neto (%)	89	91	88	89
Precio de equilibrio por encima del costo total (USD/t)	54	54	75	75
Producción de equilibrio por encima del costo total (t)	8	7	11	11

CUADRO 5

Resultados económicos del cultivo de macroalgas Eucheumatoides, considerando tasa de crecimiento mínimo

Parámetros	Estaca		Flotante	
	Precio FOB Indonesia	Precio FOB Chile	Precio FOB Indonesia	Precio FOB Chile
Ciclo de cultivo (días)	60	60	60	60
Biomasa Seca (t)	22	22	22	22
Ingreso por venta (USD)	28 948	33 402	28 948	33 402
Costo de la semilla (USD)	3 665	3 665	3 665	3 665
Costo de la rafia e hilo alquitranado (USD)	188	188	188	188
Costo de siembra (USD)	56	56	56	56
Costo mantenimiento y vigilancia (USD)	1 348	1 348	1 348	1 348
Costo de cosecha/secado (USD)	674	674	674	674
Costo variable (USD)	5 931	5 931	5 931	5 931
Depreciación (USD)	2 875	2 875	6 869	6 869
Renta (USD)	1 580	1 580	1 580	1 580
Costo fijo (USD)	4 455	4 455	8 449	8 449
Costo total (USD)	10 386	10 386	14 380	14 380
Costo de sacos de polietileno (USD)	1 133	1 133	1 133	1 133
Costo de transporte (USD)	6 444	5 370	6 444	5 370
Costos de comercialización (USD)	7 578	6 504	7 578	6 504
Ingreso Neto (USD)	2 603	7 057	-1 391	3 063
VPN (5 años, 6 %) (USD)	-35 330	-12 046	-72 126	-48 841
TIR (5 años) (%)	-	-	-	-
Recuperación de la inversión (años)	-	-	-	-
B/C	0,1	0,3	-	0,1
Ratio del beneficio neto (%)	9	21	-5	9
Precio de equilibrio por encima del costo total (US\$/t)	466	466	646	646
Producción de equilibrio por encima del costo total (t)	8	7	11	11

inversión de capital inicial, mientras que los demás costos son iguales para ambos sistemas. El valor presente neto (VPN) resultó positivo para ambos sistemas y precios FOB, excepto cuando se presenta una tasa mínima de crecimiento, donde es negativo. Las tasas internas de rentabilidad (TIR) del sistema de fondo superaron a las del sistema flotante, en las tasas de crecimiento promedio y máximo. Para la tasa de crecimiento mínimo, la TIR no pudo calcularse debido al VPN negativo. En el escenario de crecimiento promedio, la TIR fue de entre 153 % y 241 % para el sistema de fondo y entre el 44 % y el 85 % para el flotante. El análisis costo-beneficio indica que el sistema de fondo es factible con tasas de crecimiento promedio y máximo, mientras que el sistema flotante solo es factible cuando la macroalga alcanza su tasa de crecimiento máxima.

CONCLUSIONES

El cultivo de macroalgas rojas tropicales es una actividad económica altamente sensible a las tasas de crecimiento del alga. Aunque estas tasas varían solo entre 3 y 4 puntos porcentuales entre los niveles mínimo, promedio y máximo, estas pequeñas pérdidas pueden determinar si el cultivo genera pérdidas o ganancias, según la tecnología de cultivo utilizada. Para desarrollar una producción de macroalgas tropicales, particularmente Eucheumatoides, con viabilidad comercial, es fundamental establecer proyectos piloto y trabajar con especies domesticadas que garanticen tasas de crecimiento más estables.

Si bien históricamente no ha habido esfuerzos oficiales para expandir la utilización y el cultivo de macroalgas marinas en México, en años recientes la participación de la industria, inversores locales y el gobierno se ha intensificado. El apoyo de organismos gubernamentales a nivel estatal al desarrollo de esta actividad, especialmente en comunidades rurales, representa una significativa oportunidad de crecimiento para América Latina y el Caribe (Rebours *et al.*, 2014).

Aunque la inversión de capital necesaria para la acuicultura de macroalgas marinas es mayor que la recolección de poblaciones silvestres, el cultivo de macroalgas garantiza una producción homogénea y de mayor calidad a largo plazo. Las parcelas de macroalgas cultivadas atraen rápidamente numerosos organismos que aumentan la biodiversidad de especies marinas y peces. Además, la investigación sobre el uso de macroalgas para mitigar el impacto ambiental de la acuicultura intensiva de peces a través de la acuicultura multitrófica también está recibiendo cada vez más atención y merece ser considerada en nuestra región.

La inversión pública, a través de financiamiento gubernamental para promover el cultivo de macroalgas, presenta un costo razonable según este análisis, y puede considerarse más como un apoyo a grupos vulnerables que como una inversión comercial-industrial. Las normas y protocolos actuales pueden incorporarse a planes para desarrollar cultivos comerciales de macroalgas. No obstante, la transición de la investigación a la práctica comercial es lenta y podría acelerarse mediante lineamientos y trámites más ágiles y claros, ya que muchas de las normas y regulaciones vigentes están diseñadas para cultivos animales. Es necesario, además, desarrollar y evaluar sistemas de transformación que agreguen valor a esta biomasa, extrayendo diversos compuestos para múltiples aplicaciones de mayor valor, maximizando así la resiliencia y los beneficios de la producción.

El coste de producción para expandir el cultivo de macroalgas marinas podría representar una desventaja ante ciertos mercados e incertidumbres comerciales, afectando a la rentabilidad para la mayoría de los cultivadores. Aunque las aplicaciones potenciales son múltiples, actualmente solo los alimentos y los cosméticos y nutracéuticos constituyen mercados de alto valor, si bien estos requieren cantidades limitadas o están restringidos a especies específicas. Por ejemplo, en el caso de las Eucheumatoides cultivadas en países como el Brasil, el Ecuador y la República Bolivariana de Venezuela, la diversificación para el uso de esta biomasa para la elaboración de bioestimulantes agrícolas está ganando atención y mercado.

RECOMENDACIONES

Es necesario que los países de América Latina y el Caribe productores de macroalgas asuman el liderazgo para fomentar la colaboración y obtener financiación que impulse las cadenas de valor de macroalgas marinas en la región. Siguiendo las estrategias de otras regiones y alineándose con la bioeconomía azul, se sugiere:

- a) Promover la colaboración efectiva entre la comunidad científica, el sector privado y los gobiernos para compartir conocimientos y generar acciones cuantificables.
- b) Aumentar la investigación científica y la innovación en el sector.
- c) Establecer una plataforma de financiación interempresarial.

- d) Crear una identidad distintiva para los cultivadores de macroalgas marinas y desarrollar programas para su formación.
- e) Establecer centros regionales de excelencia en macroalgas marinas que aborden las brechas de conocimiento y proporcionen expertos para la divulgación y formación necesaria.

REFERENCIAS

- Alemañ, A.E., Robledo, D. y Hayashi, L. 2019. Development of seaweed cultivation in Latin America: current trends and future prospects. *Phycologia*, 58(5): 462–471. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1640996>
- Bradford Burns, E. 1986. *América Latina: A Concise Interpretive History (4ª ed.)*. Nueva York: Prentice-Hall. pp. 224–227. ISBN 978-0-13-524356-5.
- Banco Mundial. 2023 *Global seaweed new and emerging markets report*. [Consultado el 7 enero de 2023]. <https://www.worldbank.org/en/topic/environment/publication/global-seaweed-new-and-emerging-markets-report-2023>
- CNP (Carta Nacional Pesquera). 2023. *Carta Nacional Pesquera*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/892410/CNP_2023.pdf
- CONAPESCA (Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca). 2021. *Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca*. Anuario estadístico de Acuacultura y pesca 2021. [Consultado el 7 enero de 2023]. <https://www.gob.mx/conapesca/documentos/anuario-estadistico-de-acuacultura-y-pesca>
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2012. *Diario Oficial de la Federación*. Plan de Manejo para la Pesquería de Macroalgas en Baja California, México. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5280840
- Domínguez-May, R., Gasca-Leyva, E. y Robledo, D. 2017. Harvesting time optimization and risk analysis for the mariculture of *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta). *Reviews in Aquaculture*, 9(3): 227–237. <https://doi.org/10.1111/raq.12134>
- Domínguez-May, R., Hernández, J.M. y Velázquez-Abunader, I. 2024. A review of dynamic optimization in aquaculture production economics. *Reviews in Aquaculture*, 1(1): 1–22. <https://doi.org/10.1111/raq.12918>
- Flores-Nava, A., Villanueva García-Benítez, J., Vidal Martínez, V.M., Olvera Novoa, M.A., Alonzo Marrufo, E.R., Arreguín Sánchez, F., Poot López, G.R., Alonso Alemán, M. y Maldonado Repetto, A. 2016. *Diagnóstico base para la preparación del Plan Rector Acuícola y Pesquero del Estado de Yucatán*. 3. Diagnóstico del sub-sector acuícola de Yucatán. Taller Técnico FAO-Gobierno Estado de Yucatán. Proyecto UTF/MEX/117/MEX. pp. 59–116. <https://www.fao.org/mexico/noticias/detail-events/es/c/413344/>
- Hayashi, L., Bulboa, C., Kradolfer, P., Soriano, G. y Robledo, D. 2014. Cultivation of red seaweeds: a Latin American perspective. *Journal of Applied Phycology*, 26(2), 719–727. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0143-z>
- Hermans, S. 2023 *Seaweed State of the Industry*. <https://phyconomy.net/articles/2022-seaweed-review/> [Consultado el 7 enero de 2023].
- Jousselin, C., Pliego-Cortés, H., Damour, A., Garcia, M., Bodet, C., Robledo, D., Bourgougnon, N. y Lévêque, N. 2023. Anti-SARS-CoV-2 Activity of Polysaccharides Extracted from *Halymenia floresii* and *Solieria chordalis* (Rhodophyta). *Marine Drugs*, 21(6): 348. <https://doi.org/10.3390/md21060348>
- Mendez, C., Bustamante, D., Calderón, M.S., Gauna, C., Hayashi, L., Robledo, D., Tapia-Larios, C., Campbell, I., Westermeyer, R. y Murúa, P. 2023. Biosecurity baseline for a sustainable development of seaweed aquaculture in Latin America. *Marine Policy*, 159: 105933. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105933>

- Muñoz, J., Freile-Pelegrín, Y. y Robledo, D. 2004. Mariculture of *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Solieriaceae) color strains in tropical waters of Yucatán, México. *Aquaculture*, 239: 161–177. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.05.043>
- Peñuela, A., Robledo, D., Bourgougnon, N., Bedoux, G., Hernández-Núñez, E. y Freile-Pelegrín, Y. 2018. Environmentally friendly valorization of *Solieria filiformis* (Gigartinales, Rhodophyta) from IMTA using a biorefinery concept. *Marine Drugs*, 16(12): 487. <https://doi.org/10.3390/md16120487>
- Pliego-Cortés, H., Bedoux, G., Boulho, R., Taupin, L., Freile-Pelegrín, Y., Bourgougnon, N. y Robledo, D. 2019. Stress tolerance and photoadaptation to solar radiation in *Rhododymenia pseudopalmata* (Rhodophyta) through mycosporine-like amino acids, phenolic compounds, and pigments in an integrated multi-trophic aquaculture system. *Algal Research*, 41: 101542. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101542>
- Programa Nacional de Pesca y Acuicultura. 2020-2024. *Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/616554/PROGRAMA_Nacional_de_Pesca_y_Acuicultura_2020-2024baja.pdf
- Rebours, C., Marinho-Soriano, E., Zertuche-González, J.A., Hayashi, L., Vásquez, J.A., Kradolfer, P., Soriano, G., et al. 2014. Seaweeds: an opportunity for wealth and sustainable livelihood for coastal communities. *Journal of Applied Phycology*, 26: 1939–1951. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0304-8>
- Robledo, D. y Freile-Pelegrín, Y. 2011. Prospects for the cultivation of economically important carrageenophytes in southeast Mexico. *Journal of Applied Phycology*, 23(3): 415–419. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9585-8>
- Robledo, D. y Townsend, W. 2006. *Chapter 6: Seaweeds and mangroves: Improving environmental practices in coastal communities of Mexico and Jamaica*. En: Coastal Resource Management in the Wider Caribbean Resilience, Adaptation, and Community Diversity (Edited by Yvan Breton, David Brown, Brian Davy, Milton Haughton, and Luis Ovarés) Ian Randle/IDRC 2006 ISBN 1-55250-223-6 ca. 300 pp. <https://idrc-crdi.ca/en/book/coastal-resource-management-wider-caribbean-resilience-adaptation-and-community-diversity>
- Robledo, D., Gasca-Leyva, E. y Fraga, J. 2013. *Social and economic dimensions of carrageenan seaweed farming in Mexico*. En: D. Valderrama, J. Cai, N. Hishamunda & N. Ridler, (eds.) Social and economic dimensions of carrageenan seaweed farming, pp. 185-204. Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 580. Rome, FAO. <https://www.fao.org/4/i3344e/i3344e.pdf>
- Secretaría de Economía. 2024. *Plataforma de Datos DataMexico*. Gobierno de México. [Consultado el 7 enero de 2023]. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/product/seaweeds-and-other-algae-fresh-chilled-frozen-or-dried-with-or-without-land-suitable-for-human-consumption>
- Valderrama, D., Cai, J., Hishamunda, N., Ridler, N., Neish, I.C., Hurtado, A.Q., Msuya, F.E., Krishnan, M., et al. 2015. The economics of *Kappaphycus* seaweed cultivation in developing countries: a comparative analysis of farming systems. *Aquaculture Economics & Management*, 19(2): 251–277. <https://doi.org/10.1080/13657305.2015.1024348>
- Zepeda, E., Freile-Pelegrín, Y. y Robledo, D. 2020. Nutraceutical assessment of *Solieria filiformis* and *Gracilaria cornea* (Rhodophyta) under light quality modulation in culture. *Journal of Applied Phycology*, 32(4): 2363–2373. <https://doi.org/10.1007/s10811-019-02023-0>

Aspectos económicos y viabilidad del cultivo de macroalgas en la costa peruana

Juan Diego Dupuy

Empresa PSW S.A.

Lima, Perú

Dupuy, J.D. 2025. *Aspectos económicos y viabilidad del cultivo de macroalgas en la costa peruana*. En: Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Murúa Andrade, P. y Farías Molina, A. (coords.). Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 24-26 de junio de 2024, Puerto Varas, Chile. *FAO Actas de Pesca y Acuicultura*. N.º 74. Roma, FAO. pp. 271-278.

RESUMEN

El cultivo de macroalgas marinas en el Perú es una actividad que en los últimos años ha ganado interés debido a su potencial económico y ecológico. Las iniciativas para promover este cultivo en el Perú se encuentran en desarrollo emergente, impulsadas por la creciente demanda de macroalgas en diferentes industrias tanto nivel nacional como internacional. En el Perú las condiciones climáticas y oceanográficas son favorables para el cultivo de algunas especies de macroalgas. Sin embargo, la falta de infraestructura, tecnología especializada y el limitado financiamiento para la investigación e implementación representan condiciones limitantes para su desarrollo. Sumado a esto, existen pocas especies de macroalgas de interés comercial y la industrial local genera muy pocos productos con valor agregado. Este informe tiene como objetivo mostrar las experiencias en el Perú acerca de los cultivos de macroalgas marinas desarrollados a nivel comercial y piloto. Se han evaluado aspectos económicos y rendimientos productivos con la finalidad de que estos sirvan de referencia para promover alternativas de cultivo de macroalgas marinas y productos con alto valor agregado, manteniendo los costos de producción comparables a los de la biomasa extraída artesanalmente de las praderas naturales.

ANTECEDENTES

El cultivo de macroalgas en el Perú tiene una historia reciente en comparación con otros países de la región. En sus inicios, los principales estudios se centraron en la evaluación de las especies de macroalgas presentes en la costa peruana y en la identificación de áreas con potencial para el cultivo.

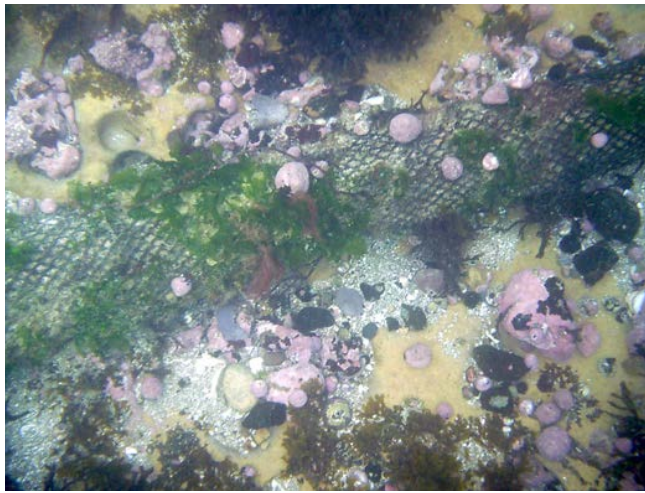
En la década de 1990, la empresa peruana AQUASUR S.A. desarrolló en la Bahía San Nicolás, ubicada al sur del país (San Juan de Marcona, departamento de Ica), el cultivo de *Gracilariopsis lemaneiformis* mediante el sembrado directo con horquillas de mangas plásticas denominadas localmente “chululos”. Esta empresa cesó operaciones debido a problemas de adaptación del método de cultivo: las corrientes marinas desplazaban los “chululos” sembrados, resultaba difícil obtener la semilla y se vieron afectados por la variabilidad climática del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (J. Orcón, comunicación personal, 2010).

FIGURA 1
Chondracanthus chamissoi sobre malla anchovetera



©J.D. Dupuy

FIGURA 2
"Chululos" instalados en el fondo marino



©J.D. Dupuy

Hasta la fecha, en el país no se han desarrollado cultivos de macroalgas marinas a mayor escala, con excepción de los tres casos de estudio que se presentan a continuación.

CULTIVO DE RHODOPHYTAS

Caso N°1: Fijación de esporas mediante sustratos artificiales

Entre los años 2004-2006, la empresa peruana Peruvian Seaweeds S.R.L. desarrolló sustratos artificiales en fondo arenofangosos para la fijación de esporas de *Chondracanthus chamissoi* en la Bahía de Paracas, ubicada al sur del país (playa Mendieta, Departamento de Ica). El objetivo era expandir las áreas de cultivo de esta especie, considerando el incremento en la demanda en la industria de carragenano. Los sustratos, denominados "chululos", consistieron en mallas anchoveteras de 100 m × 20 cm rellenos de canto rodado. Estos fueron instalados alrededor de praderas naturales previamente identificadas, cubriendo una extensión de 1 hectárea (ha). Este sistema permitía que las esporas se fijaran de manera natural, logrando así el reclutamiento y la obtención de una mayor área de sustrato (Dupuy, 2006). En la Figura 1 se aprecia la fijación de *C. chamissoi*, mientras que en la Figura 2 se muestran los "chululos" instalados en el fondo marino.

A través de este sistema de cultivo, se obtuvo una cosecha mensual de 40 toneladas, calculada para un área de 10 hectáreas y una densidad de 100 "chululos" por hectárea. Este rendimiento puede variar según el manejo y mantenimiento de los sustratos artificiales, así como por factores ambientales. En el Cuadro 1 se presentan los montos estimados para la instalación de 10 hectáreas de cultivo de *C. chamissoi*.

CUADRO 1

Montos estimados para la instalación de 10 hectáreas de *Chondracanthus chamissoi*

Ítems	Monto	IGV	Total
Personal	4 400,00	9 792,00	64 192,00
Equipos	27 080,00	4 874,40	31 954,40
Embarcación	10 800,00	1 944,00	12 744,00
Materiales de cultivo	16 570,00	2 982,60	19 552,60
Combustible	268 421,05	48,315.79	316 736,84
Movilidad	39 789,47	7 162,11	46 951,58
Total	417 060,53	75 070,89	492 131,42
Total, Incluido IGV	492 131,42	88 583,66	580 715,08

Nota: Montos estimados en USD para 10 hectáreas de cultivo durante un período de 12 meses. IGV: Impuesto General a las Ventas (18 %).

Caso N.º 2: Policultivo de *Gracilariopsis lemaneiformis* y *Argopecten purpuratus*

En el año 2014, la empresa peruana PSW S.A. aprovechó la infraestructura existente en la Bahía de Sechura para la producción de *Argopecten purpuratus* como base para instalar un sistema de cultivo para *G. lemaneiformis*. La Bahía de Sechura se localiza al norte del país en el departamento de Piura (UTM 17 M775838 E – 9606469 N) y alberga numerosas concesiones acuícolas dedicadas al cultivo de *A. purpuratus*. Mediante la Resolución Ministerial N.º 124-2020-PRODUCE, emitida por el Ministerio de la Producción (PRODUCE), se ha delimitado un ámbito de aplicación para el desarrollo de la acuicultura e investigación en esta Bahía, ya que este cultivo es de interés para los pobladores locales. Sin embargo, esta actividad, junto con otras actividades (agrícolas, industriales y domésticas), ha generado el deterioro de las condiciones ambientales, identificándose bajos niveles de oxígeno en el fondo marino, exceso de materia orgánica y problemas de contaminación en las aguas costeras (Clavijo, 2016).

Considerando la problemática ambiental identificada en esta Bahía, se propuso, en conjunto con los acuicultores locales, aprovechar el cultivo suspendido de *A. purpuratus* para instalar un sistema de cuerdas de polipropileno (cuadrantes) sobre las que se sembraron matas de *G. lemaneiformis* (100 g), logrando con ello el crecimiento vegetativo. Este sistema permite la generación de empleo y activación de la economía local, así como la sostenibilidad ambiental, ya que el cultivo de macroalgas marinas mejora las condiciones de la calidad de agua y genera un impacto positivo en el medio ambiente.

Este sistema de cultivo tiene una extensión de 1 hectárea, donde se cuenta con 11 líneas de fondeo (*long-lines*) y 10 espacios entre estos. En cada espacio identificado se pueden instalar 15 cuadrantes de 6 m² formados por 12 cuerdas de polipropileno que producen un promedio estimado de 4,45 kg de biomasa fresca. Después de la instalación, se espera entre dos y tres meses para la cosecha. Este sistema de cultivo operó durante cuatro meses, obteniéndose un porcentaje de crecimiento de 400 % (PSW, 2014). Debido al corto tiempo de ejecución, no se pudo evidenciar el efecto de la estacionalidad. A pesar de esta limitación, se calculó que la producción anual sería de 48 060 kg, realizando seis cosechas al año. Esta biomasa fresca, según el factor de conversión obtenido (8.14:1) se transforma en 5 904 kg de biomasa deshidratada lista para ser comercializada (PSW, 2014). En el Cuadro 2 se presentan los montos estimados para la instalación de 30 hectáreas de cultivo de *G. lemaneiformis*.

CUADRO 2

Montos estimados para la instalación de 30 hectáreas de *Gracilariopsis lemaneiformis*

Ítems	Monto	IGV	Total
Personal	70 000,00	12 600,00	82 600,00
Equipos	2 631,00	473,58	3 104,58
Embarcación	10 800,00	1 944,00	12 744,00
Materiales de cultivo	194 736,00	35 052,48	229 788,48
Combustible	268 421,00	48 315,78	316 736,78
Movilidad	39 790,00	7 162,20	46 952,20
Material biológico	18 000,00	3 240,00	21 240,00
Obras civiles	13 160,00	2 368,80	15 528,80
Total	617 538,00	111 156,84	728 694,84

Nota: Montos estimados en USD para 30 hectáreas de cultivo durante un período de 12 meses. IGV: Impuesto General a las Ventas (18 %).

En la Figura 3 muestra a los pobladores locales armando y confeccionando los cuadrantes sembrados de *G. lemaneiformis*. Las Figuras 4 y 5 ilustran la instalación en el mar, mientras que la Figura 6 presenta el desarrollo a 20 días de cultivo.

FIGURA 3
Participación de pobladores locales en el armado y confección de cuadrantes



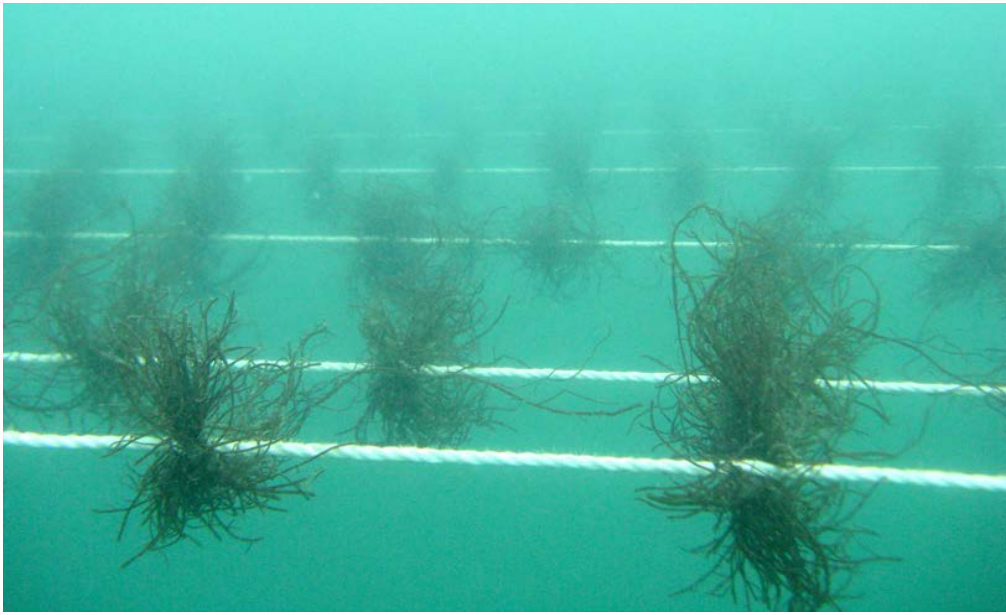
©J.D. Dupuy

FIGURA 4
Instalación en el mar de cuadrantes sembrados de *Gracilariopsis lemaneiformis*



©J.D. Dupuy

FIGURA 5
Cuadrantes suspendidos instalados de *Gracilariopsis lemaneiformis*



©J.D. Dupuy

FIGURA 6
Desarrollo de biomasa de *Gracilariopsis lemaneiformis* (20 días)



©J.D. Dupuy

CULTIVO DE PHAEOPHYTAS

Caso N.º 3: Cultivo de macroalgas pardas

En el año 2008, la empresa PSW S.A., desarrolló en la Bahía San Nicolás el cultivo de macroalgas pardas (*Macrocystis* sp., *Lessonia* sp.) empleando el sistema de líneas de fondeo (*long-lines*). Este proyecto surgió debido a la sobreexplotación del recurso y la evidente necesidad de contar con materia prima proveniente de una fuente sostenible para la elaboración de productos destinados a la industria agropecuaria.

Este cultivo se origina mediante la colecta de esporofilas fértiles provenientes de una pradera natural cercana al área de cultivo (concesión marina). Las esporofilas son sometidas a estrés físico y posteriormente trasladadas al *hatchery* de la empresa ubicado en Pisco, departamento de Ica (UTM 18L 367504 E – 8480970 S), a una distancia aproximada de 500 km del área de colecta (siete horas de traslado).

Una vez en el *hatchery*, se realiza la esporulación para luego inocular cuerdas de nylon (bastidores), que se mantienen en acuarios con agua de mar bajo condiciones controladas de laboratorio (temperatura, fotoperiodo y nutrición). Transcurridos de dos a tres meses, cuando los esporofitos alcanzan una talla adecuada, son trasladados a la concesión marina, donde se siembran mediante el sistema de cuerdas o reinales amarrados a una línea de fondo (*long-line*), a una profundidad entre 3 y 5 m. Después de 30 a 60 días, los esporofitos crecen hasta alcanzar una talla entre 15 y 30 cm. Debido a la alta densidad en los reinales, es necesario realizar un “desdoble” (proceso que reduce la densidad de siembra al extraer y resembrar los esporofitos en otro reinal). En estos nuevos reinales, los esporofitos se mantienen con baja densidad hasta la cosecha, la cual se realiza cinco meses después del desdoble.

Inicialmente se sembró 1 hectárea de cultivo de *Macrocystis* sp., con una densidad de 11 líneas de fondo (*long-lines*) y 200 reinales por cada uno. La producción de biomasa fresca obtenida para esta especie fue de 1 500 a 2 000 kg/línea de fondo en cada ciclo de cultivo, considerando que cada ciclo dura entre nueve y 10 meses desde el inicio de la esporulación. En el Cuadro 3 se presentan los montos estimados para la instalación de 1 hectárea de cultivo de *Macrocystis* sp.

CUADRO 3

Montos estimados para la instalación de 30 hectáreas de cultivo de *Macrocystis* sp.

Ítems	Monto	IGV	Total
Personal	30 000,00	5 400,00	35 400,00
Equipos	10 000,00	1 800,00	11 800,00
Embarcación	15 000,00	2 700,00	17 700,00
Materiales de cultivo	157 894,74	28 421,05	186 315,79
Combustible	52 631,58	9 473,68	62 105,26
Movilidad	28 947,37	5 210,53	34 157,89
Material biológico	90 000,00	16 200,00	106 200,00
Obras civiles	25 000,00	4 500,00	29 500,00
Total	409 473,68	73 705,26	483 178,95

Nota: Montos estimados en USD para 30 hectáreas de cultivo durante un período de nueve meses. IGV: Impuesto General a las Ventas (18 %).

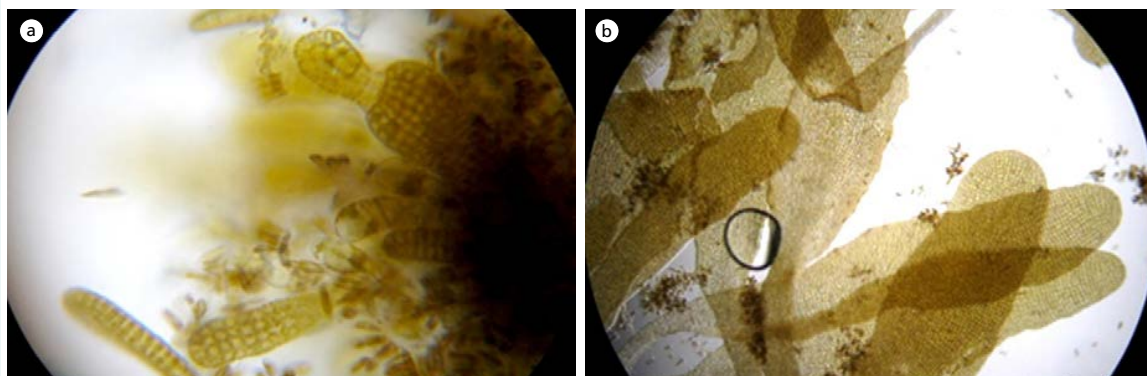
En la Figura 7 se observa el desarrollo de esporofitos de 15 y 45 días, después de realizada la esporulación en el *hatchery*. En la Figura 8, los reinales sembrados de *Macrocystis* sp. son llevados al mar después del desdoble; mientras que en la Figura 9 se aprecia el cultivo a los 45 días de realizar el desdoble y la cosecha de las líneas de fondo (*long-lines*), respectivamente.

CONCLUSIONES

Los sustratos artificiales, como los “chululos”, representan una alternativa prometedora para ampliar la superficie de fijación natural de esporas de *C. chamissoi*. Para maximizar su eficacia, deben instalarse con una separación de 1 m entre ellos, lo que favorece una fijación óptima y un mejor establecimiento de las algas en su entorno. Además, se pueden aprovechar las estructuras del cultivo de *A. purpuratus* ya operativo para la siembra de macroalgas, optimizando recursos y aumentando la producción de biomasa.

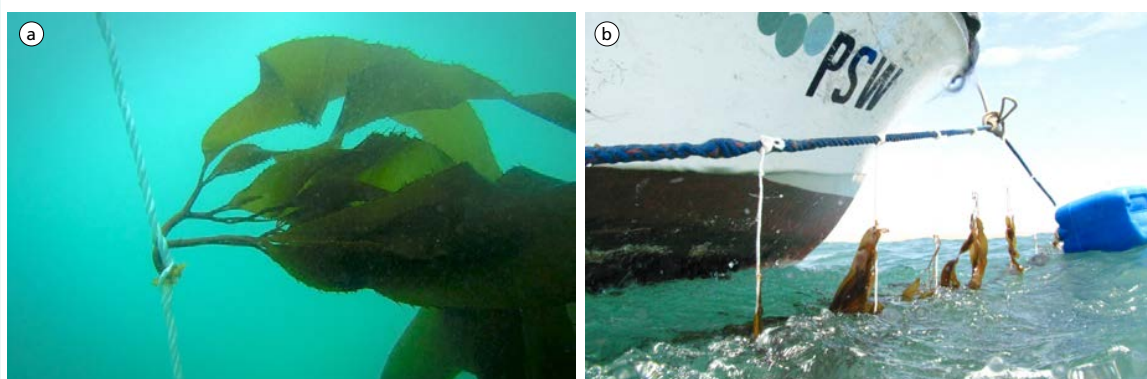
En el caso de *G. lemaneiformis*, a pesar del corto período en que se realizó el piloto, se ha logrado un incremento notable del 400 % en la biomasa en 2 meses, lo

FIGURA 7
Vista desde el microscopio de esporofitos de *Macrocystis* sp. a los 15 días de desarrollo (a); Esporofitos a los 45 días de desarrollo (b)



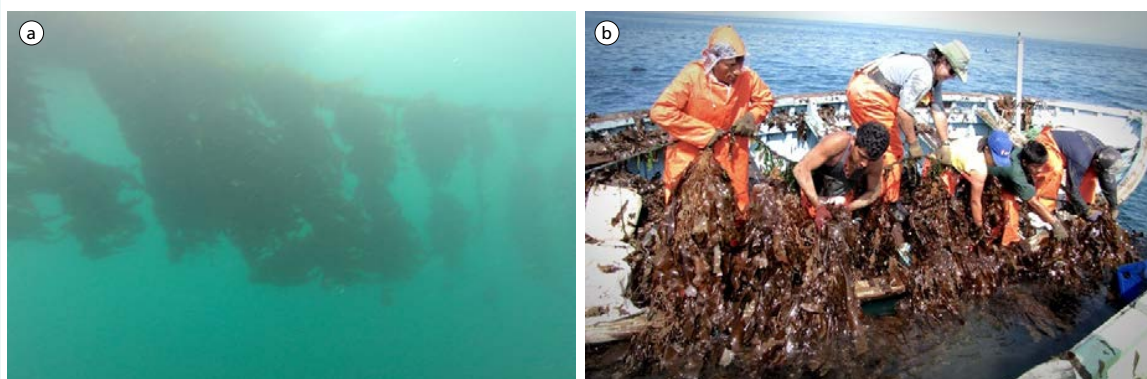
©J.D. Dupuy

FIGURA 8
Esporofito desdoblado en reinal (a); Reinales sembrados en líneas de fondeo (*long-line*) después del desdoble (b)



©J.D. Dupuy

FIGURA 9
Cultivo a los 45 días después del desdoble (a); Cosecha de líneas de fondeo (*long-line*) (b)



©J.D. Dupuy

que refuerza su potencial para cultivos comerciales. Por su parte, en *Macrocystis* sp., la densidad máxima recomendada es de 11 líneas de fondo por hectárea, con 200 reinales en cada una. Su ciclo de cultivo varía entre 9 y 10 meses desde la esporulación. La implementación de este tipo de cultivo resulta clave para reducir la presión extractiva sobre las praderas naturales de macroalgas, contribuyendo así a la sostenibilidad de los ecosistemas marinos.

RECOMENDACIONES

Para impulsar el cultivo de macroalgas marinas en el Perú, es fundamental realizar una inversión significativa en investigación y desarrollo con el fin de optimizar los sistemas de cultivo y producción, desde la siembra hasta la cosecha. La incorporación de tecnologías más eficientes permitirá reducir los costes de mano de obra, favoreciendo así la sostenibilidad económica del sector. Asimismo, resulta imprescindible establecer políticas y regulaciones claras que fomenten un desarrollo sostenible y rentable para la industria de las macroalgas marinas.

A la hora de seleccionar las zonas de cultivo, es crucial tener en cuenta no solo las condiciones físico-químicas del entorno, como la temperatura, salinidad y concentración de nutrientes en el agua, sino también la accesibilidad del área. Esto garantizará que la infraestructura necesaria, como el *hatchery* y las instalaciones de cultivo, puedan establecerse de manera eficiente. La proximidad entre la zona de cultivo y el *hatchery* es un factor clave para optimizar la logística y reducir los costes de transporte, mejorando la eficiencia del proceso.

El cultivo de macroalgas marinas tiene un impacto positivo en distintos ámbitos: económico, social y ambiental. Desde el punto de vista económico, contribuye al desarrollo de una industria sostenible que genera empleo y diversifica las fuentes de ingreso en las zonas costeras. A nivel social, impulsa la integración de las comunidades locales en la actividad productiva. En términos ambientales, ayuda a preservar los ecosistemas marinos al disminuir la presión sobre las praderas naturales y favorecer la biodiversidad.

REFERENCIAS

- Clavijo, G. 2016. *Diagnóstico situacional de la calidad del agua de la Bahía de Sechura*. Tesis para obtener el título de Ingeniería Ambiental. En Universidad Alas Peruanas. Piura, Perú. [Consultado el 18 de mayo de 2024]. <https://hdl.handle.net/20.500.12990/4050>
- Dupuy, J.D. 2006. *Estudio de fijación de esporas de Chondracanthus chamissoi según distintos sustratos artificiales y distanciamientos de cultivo en la pradera natural de playa Mendieta, Reserva Nacional de Paracas, Perú*. Tesis de Pregrado, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Ricardo Palma, Perú.
- PRODUCE (Ministerio de la Producción del Perú). 2020. Resolución Ministerial N.º 124-2020-PRODUCE. Lima, Perú. <https://www.gob.pe/institucion/produce/normas-legales/462568-124-2020-produce>
- PSW S.A. 2014. *Desarrollo del policultivo piloto de algas marinas y concha de abanico (Argopecten purpuratus) en la Bahía de Sechura, provincia de Sechura, Departamento de Piura*. Reporte técnico. Lima, Perú.

ANEXOS

1. PROSPECTO DEL TALLER	281
2. PROGRAMA DEL TALLER	283
3. LISTA DE PARTICIPANTES	285
4. PERFIL DE EXPERTOS	287
5. FOTOGRAFIA DE GRUPO	295

Anexo 1 – Prospecto del taller

ESTADO Y PERSPECTIVAS DEL CULTIVO DE MACROALGAS EN AMÉRICA LATINA (ACUIALGAS)

24-26 DE JUNIO 2024 – PUERTO VARAS, CHILE

CONTEXTO

La acuicultura de macroalgas marinas representa un sector industrial y de producción de alimentos capaz de contribuir significativamente al aumento de la seguridad alimentaria, respaldar los medios de subsistencia, abrir oportunidades de negocios y proporcionar valiosos servicios ecosistémicos. Recientemente, la acuicultura de macroalgas marinas ha despertado un interés considerable debido a su enorme potencial para abordar importantes desafíos medioambientales, sociales y económicos. Este interés se reflejó en la Cumbre de Sistemas Alimentarios de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2021, donde se identificó el impulso de soluciones basadas en la naturaleza como una de las cinco áreas clave de acción para alcanzar los objetivos de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

En este contexto, las macroalgas, son productores primarios que no solo ofrecen un cultivo con una baja huella ambiental, sino también una serie de servicios ecosistémicos. Estos incluyen la absorción del exceso de nutrientes en las aguas costeras y la creación de hábitats para otras especies marinas.

La producción de macroalgas está bien posicionada para ofrecer medios de vida sostenibles, equitativos y resilientes a las comunidades costeras, y puede contribuir de manera significativa a las cadenas de suministro de alimentos a nivel nacional e internacional y tienen el potencial de transformar los sistemas alimentarios mundiales, al tiempo que mitigan los efectos del cambio climático.

En cuanto a su actividad a nivel mundial, las macroalgas han experimentado una evolución significativa, mostrando una marcada tendencia al alza en los volúmenes disponibles, con un aumento promedio anual del 5,69 % durante el periodo 2010–2020. Sin embargo, en este periodo solo el 1,4 % de la participación global en el desembarque de macroalgas (captura + cultivo) la tuvo la región de América Latina y el Caribe, disminuyendo a 0,1 % en el caso del cultivo. Esta brecha evidencia un espacio significativo de oportunidades para su desarrollo.

En respuesta a una solicitud de sus Miembros, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) llevó a cabo dos seminarios virtuales durante el año 2022. El primero convocó a países miembros de Asia y África, con la participación de 20 países, mientras que el segundo se dirigió a países de América Latina y el Caribe, también con la participación de 20 países de la región.

En esta área geográfica, la actividad relacionada con las macroalgas presenta una gran diversidad de realidades, con niveles diversos de desarrollo. Algunos países cuentan con industrias establecidas y gobernanzas consolidadas, mientras que otros se encuentran en etapas más tempranas, y algunos aún no han explorado esta actividad.

OBJETIVOS

Identificar y compartir cómo las estrategias y políticas nacionales pueden respaldar el desarrollo de la acuicultura de macroalgas marinas en América Latina, en el cumplimiento de los objetivos declarados en la Agenda 2030 para el Desarrollo

Sostenible, centrándose en su contribución a la seguridad alimentaria, los medios de vida, la generación de ingresos y la restauración de los ecosistemas.

Objetivos específicos:

- Compartir experiencias sobre el desarrollo y funcionamiento de la acuicultura de macroalgas.
- Identificar oportunidades y desafíos para la expansión de la acuicultura de macroalgas.
- Identificar las brechas en las políticas de los países y comprender cómo los marcos estratégicos y políticos nacionales pueden respaldar el desarrollo de la acuicultura de macroalgas y la creación de capacidades.
- Identificar las prioridades para orientar el trabajo futuro de la FAO en el desarrollo de la acuicultura de macroalgas marinas.

PRESENTACIONES, DISCUSIONES Y PRODUCTOS

- El Taller ACUIALGAS se desarrollará en seis sesiones de mediodía cada una comprendiendo tres días de Taller (24 a 26 junio 2024), en las cuáles participarán todos los conferencistas.
- Cada sesión se iniciará con la presentación por una hora del informe comisionado que es una revisión amplia de América Latina sobre el tema que se sesiona (30 minutos de exposición y 30 minutos de preguntas y discusión).
- Luego del informe comisionado, habrá presentaciones de 30 minutos para estudios de caso en diferentes países de América Latina (20 minutos de exposición y 10 minutos de preguntas y discusión).
- Al final de cada sesión se conformará una mesa redonda para análisis y conclusiones de los temas tratados.
- La Secretaría del Taller participará en una reunión de redacción el cuarto día por la mañana (27 de junio 2024).

ORGANIZADORES Y SECRETARÍA DEL TALLER

La organización y la Secretaría del Taller es la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (www.fao.org/fishery/es) y la Universidad Austral de Chile (www.pmontt.uach.cl/).

PARTICIPANTES

Participarán 27 conferencistas expertas y expertos en diferentes aspectos y enfoques de la acuicultura de macroalgas provenientes de Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, México, Perú y la República Bolivariana de Venezuela.

Anexo 2 – Programa del taller

ESTADO Y PERSPECTIVAS DEL CULTIVO DE MACROALGAS EN AMÉRICA LATINA (ACUIALGAS)

24-26 DE JUNIO 2024 – PUERTO VARAS, CHILE

DÍA	TEMA	TÓPICO	EXPOSITOR/PAÍS
1 (24/06)	Inauguración taller		
	1. La alimentación y los productos biotecnológicos derivados de macroalgas	Perspectivas sobre el uso de macroalgas como fuente alimentaria de alto valor en América Latina (Ic)*	Javier Parada (UACH, Chile)
		Perspectivas para la alimentación: uso de macroalgas cultivadas en Chile para la alimentación humana (Ee)*	Cristian Agurto (UDEDEC, Chile)
		Utilización de macroalgas para la extracción de ficocoloides en la Argentina (Ee)	Melanie Hughes (UNS, Argentina)
		<i>Mesa redonda y conclusiones</i>	<i>Moderación</i>
	2. Gobernanza y planificación normativa de la acuicultura de macroalgas	Estado actual y retos del marco regulatorio para el cultivo de macroalgas en América Latina (Ic)	José Ávila (Univ. Cient. del Sur, Perú)
		Gobernanza en el cultivo de macroalgas comerciales en Chile (Ee)	Marisol Álvarez (SUBPESCA, Chile)
		Viabilidad legal para la diversificación y el escalamiento de cultivos de macroalgas en América Latina: el caso de <i>Kappaphycus</i> (Ee)	Miguel Sepúlveda (Seaweed Consulting, Brasil)
		<i>Mesa redonda y conclusiones</i>	<i>Moderación</i>
	2 (25/06)	3. Gestión sostenible y aprovechamiento de los servicios ecosistémicos en los cultivos de macroalgas	Desafíos y oportunidades para la consolidación de la acuicultura de macroalgas en América Latina: perspectivas ecológicas, ambientales y de bioseguridad (Ic)
El potencial rol de la acuicultura de macroalgas en un contexto de cambio climático (Ee)			Pablo Leal (IFOP, Chile)
Bioseguridad en la acuicultura de macroalgas chilenas: el caso de <i>Gracilaria chilensis</i> (Ee)			Pedro Murúa (UACH, Chile)
<i>Mesa redonda y conclusiones</i>			<i>Moderación</i>
4. Perspectiva técnica de las tecnologías de cultivo de macroalgas		Perspectiva técnica de las tecnologías de cultivo de macroalgas en América Latina y el Caribe (Ic)	Carolina Camus Alejandro Buschmann (ULagos, Chile)
		Acuicultura de macroalgas en el Perú (Ee)	Paul Baltazar (Univ. Científica, Perú)
		Estado actual y perspectivas del cultivo de macroalgas en el Ecuador (Ee)	Adrián Márquez (ESPOL, Ecuador)
		Aspectos técnicos de la acuicultura de macroalgas en la República Bolivariana de Venezuela (Ee)	Raúl Rincones (Agromarina, la República Bolivariana de Venezuela)
		<i>Mesa redonda y conclusiones</i>	<i>Moderación</i>

DÍA	TEMA	TÓPICO	EXPOSITOR/PAÍS
3 (26/06)	5. Responsabilidad social, el trabajo digno, la inclusión de la juventud y la igualdad de género en el cultivo de macroalgas	Perspectiva territorial y social del cultivo de macroalgas de pequeña escala en América Latina (Ic)	Marcela Avila (UST, Chile) Cecilia Godoy (Consultor, Chile)
		Perspectiva antropológica del uso del maritorio en comunidades algueras (Ee)	Francisco Araos (UDEC, Chile)
		Aspectos socioeconómicos de acuicultores de macroalgas en pequeña escala en el Brasil (Ee)	Amaral, Marcella (Univ. Fed. do Rio Grande, Brasil)
		<i>Mesa redonda y conclusiones</i>	<i>Moderación</i>
	6. Cadenas de valor, acceso a mercados y comercio	Economic challenges and opportunities to strengthen seaweed production in Latin America and the Caribbean (Ic)	Wagner Valenti (Univ. Sao Paulo, Brasil)
		Cultivo de macroalgas tropicales en México: perspectiva económica, financiamiento y rentabilidad (Ee)	Daniel Robledo (CINESTAV, México)
		Aspectos económicos y viabilidad del cultivo de macroalgas en la costa peruana (Ee)	Juan Dupuy (PSWSA, Perú)
		<i>Mesa redonda y conclusiones</i>	<i>Moderación</i>
Clausura taller			

* **Ic** = Informe comisionado de amplio alcance; **Ee** = Estudio específico de caso.

Anexo 3 – Lista de participantes

ARGENTINA

Melanie HUGHES

Departamento de Biología, Bioquímica y Farmacia
Universidad Nacional del Sur
San Juan, 670
Código postal: 8000
Bahía Blanca, Argentina
melanie.hughes@uns.edu.ar

BRASIL

Marcella ARAÚJO DO AMARAL CARNEIRO

Departamento de Oceanografía e Liminología
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Via Costeira Sen. Dinarte Medeiros Mariz
Código postal: 59014-002
Rio Grande do Norte, Brasil
marcellamaralcarneiro@gmail.com

Miguel SEPÚLVEDA

Seaweed Consulting
Rua da Praia 100, Praia Vermelha
Ilha Grande, Angra dos Reis
Código postal: 23968000
Río de Janeiro, Brasil
seaweedconsulting@gmail.com

Wagner VALENTI

Aquaculture Centre
São Paulo State University
Rua das Uvaías 55, Apto. 31
Código postal: 04055-110
Sao Paulo, Brasil
w.valenti@unesp.br

CHILE

Cristián AGURTO MUÑOZ

Laboratorios GIBMAR Centro de Biotecnología
Universidad de Concepción
Barrio Universitario s/n
Código postal: 4030000
Concepción, Chile
cagurto@udec.cl

Marisol ÁLVAREZ

Unidad de Gestión y Políticas
División de Acuicultura
Subsecretaría de Pesca y Acuicultura de Chile
Nueva Marina 330, Depto. 92
Código postal: 2520000
Viña del Mar, Chile
malvarez@subpesca.cl

Francisco ARAOS

Departamento de Antropología
Universidad de Chile
Av. Capitán Ignacio Carrera Pinto 1045
Código postal: 7800284
Santiago, Chile
francisco.araos@uchile.cl

Marcela AVILA

Centro Acuícola Pesquero de Investigación Aplicada
Facultad de Recursos Naturales y Medicina
Veterinaria
Universidad Santo Tomas
Egaña 489
Código postal: 5502305
Puerto Montt, Chile
mavila4@santotomas.cl

Alejandro BUSCHMANN

Centro i~mar, CeBiB
Núcleo Milenio MASH
Universidad de Los Lagos
Camino Chinquihue km 6
Código postal: 5480000
Puerto Montt, Chile
abuschma@ulagos.cl

Carolina CAMUS

Centro i~mar, CeBiB
Núcleo Milenio MASH
Universidad de Los Lagos
Camino Chinquihue km 6
Código postal: 5480000
Puerto Montt, Chile
carolina.camus@ulagos.cl

Ana FARÍAS MOLINA

Instituto de Acuicultura y Medio Ambiente
Núcleo INLARVI
Sede Puerto Montt
Universidad Austral de Chile
Bahía Corcovado, Parcela 6
Código postal: 5550000
Puerto Varas, Chile
afarias@uach.cl

Sylvain FAUGERON

Facultad de Ciencias Biológicas
Pontificia Universidad Católica de Chile
Avda. Libertador Bernardo O'Higgins 340
Código postal: 8331150
Santiago, Chile
sfaugeron@uc.cl

Sebastián GATICA

CoLab
Pontificia Universidad Católica de Chile
Avda. Vicuña Mackenna 4860
Código postal: 6904411
Santiago, Chile
sgatica@uc.cl

Cecilia GODOY

Fundación Bordemar
Decher 1010, Casa 1000
Código postal: 5550000
Puerto Varas, Chile
mcgodoya@gmail.com

Pablo LEAL

Departamento de Repoblación y Cultivo
Instituto de Fomento Pesquero
Balmaceda 252
Código postal: 5480000
Puerto Montt, Chile
pablo.leal@ifop.cl

Pedro MURÚA

Instituto de Acuicultura y Medio Ambiente
Núcleos Milenio MASH e INLARVI
Sede Puerto Montt
Universidad Austral de Chile
Los Pinos s/n
Código postal: 5480000
Puerto Montt, Chile
pedro.murua@uach.cl

Teresa NILO

Algueros y algueras de Chile
La Reina s/n
Código postal: 1630000
Freirina, Atacama, Chile
teresanilo_2014@hotmail.com

Javier PARADA

Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos
Facultad de Ciencias Agrarias y Alimentarias
Campus Isla Teja
Universidad Austral de Chile
Avda. Julio Sarrazín s/n
Código postal: 5090000
Valdivia, Chile
javier.parada@uach.cl

ECUADOR**Adrián MARQUEZ**

Centro Nacional de Acuicultura e Investigaciones
Marinas
Escuela Superior Politécnica del Litoral
Código postal: 240203
Salinas, Ecuador
ajmarque@espol.edu.ec

MÉXICO**Daniel ROBLEDO**

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados
Departamento de Recursos del Mar
Unidad Mérida
Km 6 Antigua carretera a Progreso
Apdo. postal 73, Cordemex
Código postal: 97310
Mérida, Yucatán, México
Daniel.robledo@cinvestav.mx

José A. ZERTUCHE GONZÁLEZ

Instituto de Investigaciones Oceanológicas
Universidad Autónoma de Baja California
Carr. Transpeninsular 3917
Código postal: 22879
Ensenada, Baja California, México
zertuche@uabc.edu.mx

PERÚ**Juan Diego DUPUY**

Empresa PSW S.A.
Av. Roca y Bologna 1094
Código postal: 15048
Miraflores, Lima, Perú
juan.dupuy@pswsa.com

Paul BALTAZAR GUERRERO

Laboratorio de Investigación en Cultivos Marinos
Universidad Científica del Sur
Los Sauces 154, Urb. Jardines de Viru
Código postal: 07011
Bellavista, Lima, Perú
pbaltazar@cientifica.edu.pe

ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA**José AVILA**

Biosphere Sciences & Engineering
Carnegie Science
260 Panama St., Stanford
Código postal: 94305
California, Estados Unidos de América
jcpel1989@gmail.com

VENEZUELA (REPÚBLICA BOLIVARIANA DE)**Raúl RINCONES**

Agromarina BIORMA Aquaculture, C.A.
Avda. Sur 8, Qta. La Pradera
Urb. Los Naranjos del Hatillo, Miranda
Código postal: 1081
Caracas, República Bolivariana de Venezuela
agromarina@gmail.com

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA**José AGUILAR MANJARREZ**

Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe
Avda. Dag Hammarskjöld 3241
Código postal: 7630412
Vitacura, Santiago, Chile
jose.aguilarmanjarrez@fao.org

Alessandro LOVATELLI

Tecnología y Producción
Área de la Acuicultura Sostenible
División de Pesca y Acuicultura
Viale Terme di Caracalla
Código postal: 00153
Roma, Italia
alessandro.lovatelli@fao.org

Anexo 4 – Perfiles de expertos

AGUILAR MANJARREZ, José

Doctor y Magíster en Acuicultura por la Universidad de Stirling (Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte), con licenciatura en Oceanografía por la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) en México. Desde su incorporación a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en 1996, ha desempeñado un papel clave en la formulación e implementación de iniciativas innovadoras para el desarrollo sostenible de la acuicultura en más de 45 países. Su trabajo se centra en áreas clave como la planificación y la gestión espacial –abarcando la zonificación acuícola, la selección de sitios y áreas de manejo, así como la evaluación de la capacidad de carga–, el enfoque ecosistémico, la adaptación al cambio climático, la maricultura en mar abierto y la gestión del riesgo de desastres. Su liderazgo ha sido determinante en la generación de conocimiento y en el diseño de políticas, reflejado en la coordinación y autoría de más de 50 publicaciones de la FAO y numerosos artículos científicos. En junio de 2019, asumió el cargo de Oficial de Pesca y Acuicultura en la Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, desde donde continúa impulsando soluciones innovadoras para fortalecer la resiliencia y la sostenibilidad del sector acuícola en la región.

AGURTO MUÑOZ, Cristián

Biólogo Marino de la Universidad de Concepción (Chile), Diplomado en Biología y Doctor en Oceanografía Biológica y Química de la Universidad de Kiel (Alemania). Profesor asociado y director del Departamento de Ciencia y Tecnología de los Alimentos de la Facultad de Farmacia de la Universidad de Concepción (UdeC). Fundador y director ejecutivo de GIBMAR del Centro de Biotecnología UdeC. Cuenta con una amplia experiencia en el escalamiento de cultivos inductivos, extracción de compuestos bioactivos algales, caracterización química y en la formulación de nuevos bioproductos y bioprocesos. Ha participado activamente como director, director alterno e investigador principal en más de 58 proyectos de I+D+I+E de ANID, CORFO, FIC y organismos internacionales. Además, ha sido profesor guía de múltiples tesis de pregrado y posgrado, así como de seis posdoctorados. Es autor y coautor de diversas publicaciones WOS Q1 en el área de biotecnología y bioingeniería, con aplicaciones en nutraceuticos, aditivos funcionales, agroalimentación y biomedicina. Ha registrado más de 28 solicitudes de patentes a nivel nacional e internacional y tres marcas comerciales. Ha recibido más de 10 premios “Ciencia con Impacto UdeC” y ha sido nominado en varias ocasiones a los premios nacionales de innovación Avonni, así como a los premios comunales y regionales de ciencias aplicadas de la CPC. Adicionalmente, es socio fundador de Coloris Biotec SpA y Algiddeon Biotech SpA.

ÁLVAREZ, Marisol

Bióloga Marina por la Universidad de Valparaíso (Chile). Encargada de la Unidad de Gestión y Políticas de la División de Acuicultura de la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura, y Secretaría Ejecutiva de la Comisión Nacional de Acuicultura de Chile. Desde 1995, se desempeña en la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura de Valparaíso, donde ha trabajado en la administración y ordenamiento de la acuicultura, la gestión de la Comisión Nacional de Acuicultura, la coordinación de los Comités Científico-Técnicos de Acuicultura y la coordinación del Programa de Investigación de Acuicultura y Acuicultura de Pequeña Escala, entre otras responsabilidades. Además, ha representado a la Subsecretaría en diversos foros nacionales e internacionales, destacándose su participación en la Comisión de Pesca en Pequeña Escala, Artesanal y Acuicultura para América Latina y el Caribe (COPPESAALC) y en el Subcomité de Acuicultura de la FAO.

ARAOS, Francisco

Profesor Asociado de la Universidad de los Lagos (ULagos, Chile). Antropólogo Social por la Universidad de Chile y Doctor en Ambiente y Sociedad por la Universidad Estadual de Campinas

(Brasil). Especialista en sostenibilidad y conservación de la biodiversidad, cuenta con más de 20 años de experiencia en proyectos interdisciplinarios de investigación y desarrollo en el ámbito socioambiental. Es investigador principal del Grupo de Antropología de la Conservación y director del Laboratorio de Ciencia Ciudadana de la ULagos. Trabaja como profesor de la carrera de Antropología, así como en el Magister y el Doctorado en Ciencias Sociales con especialización en Estudios Territoriales en la ULagos. Miembro activo de redes internacionales de investigación, ha publicado numerosos artículos en revistas científicas nacionales e internacionales. Actualmente, ejerce como vicepresidente del Colegio de Antropólogas y Antropólogos de Chile para el período 2023–26.

ARAÚJO DO AMARAL CARNEIRO, Marcella

Licenciada en Ciencias Biológicas y Máster en Bioecología Acuática por la Universidad Federal de Río Grande del Norte (UFRN, Brasil). Doctora en Ciencias Biológicas (Botánica) por la Universidad de São Paulo (USP, Brasil). Ha trabajado como investigadora posdoctoral en el Programa Ciencias del Mar/CAPES y en el Programa PNPd/CAPES PRODEMA/UFRN. Fue presidenta de REDEALGAS (Red Nacional en Biotecnología de Macroalgas Marinas) durante el ciclo 2022-23. Actualmente, es investigadora y profesora colaboradora en la UFRN, donde participa en los programas de grado en Ciencias Biológicas, Ecología e Ingeniería en Acuicultura. Cuenta con experiencia en Ficología, con especialización en maricultura y acuicultura multitrofica integrada (IMTA). Sus principales líneas de investigación incluyen el cultivo de macroalgas en laboratorio y en el mar, el uso de algas como biofiltro, la biodiversidad, ecología y gestión de macroalgas marinas, los servicios ecosistémicos de ambientes costeros y marinos, la extracción de polisacáridos y pigmentos de algas, y la fotosíntesis *in situ* (PAM). Además, desarrolla actividades de extensión universitaria en educación ambiental marina, promoviendo la divulgación del conocimiento científico entre comunidades pesqueras y tradicionales.

ÁVILA, José

Doctor en Biología con especialización en algas marinas por la Universidad de Chosun (República de Corea). Actualmente, se desempeña como investigador posdoctoral en el Instituto Carnegie, Departamento de Biología de Plantas, en Stanford, California (Estados Unidos de América). Su investigación se centra en criopreservación, el cultivo *in vitro* y la genética de macroalgas, con el objetivo de mejorar los sistemas tradicionales de cultivo. Asimismo, cuenta con experiencia en el manejo de bancos de germoplasma de algas y en la identificación de macroalgas a nivel morfológico y molecular. Ha trabajado como consultor en la Universidad de Ciencia y Tecnología del Rey Abdalá (KAUST, por sus siglas en inglés) en Arabia Saudita (septiembre 2022 – febrero 2023) y la empresa PSW S.A. en el Perú (agosto 2023 - febrero 2024) en proyectos relacionados con el cultivo de macroalgas marinas en laboratorio y a mediana escala. Asimismo, es investigador colaborador del Grupo de Investigación de Acuicultura Sostenible de la Universidad Científica del Sur (Perú) y cofundador y administrador de la iniciativa de divulgación científica “Macroalgas Marinas del Perú”. Le apasiona la difusión de los conocimientos científicos a toda la comunidad, el aumento del impacto social de la academia a través de un enfoque interdisciplinario y el empoderamiento de jóvenes investigadores.

AVILA, Marcela

Magister en Acuicultura, Recursos, Impacto y Gestión por la Università degli Studi di Genova (Italia) y Bióloga Marina de la Universidad de Concepción (Chile). Ha dirigido y participado en diversos proyectos financiados por FONDEF (ANID); FIPA (SUBPESCA); FDI (CORFO) y entidades privadas. Su experiencia se centra en el manejo de recursos algales, el desarrollo de tecnologías de cultivo, el repoblamiento de macroalgas chilenas y proyectos de transferencia para la pesca artesanal. Entre sus proyectos destacan: Innovación de la producción de luche (*Pyropia* spp.) por medio de la captación natural, mejoramiento de la cadena de valor y la articulación de productores de pequeña escala en la Región de los Lagos; Evaluación de praderas y estrategias de sustentabilidad para el recurso luga negra y luga roja entre las regiones de Los Lagos y Magallanes;

Entrada de mujeres en la pequeña pesca artesanal en Chile: ¿cooperación o conflicto?; Determinación de factores que inducen la maduración en reproducción de algas rojas *Chondracanthus chamissoi* y *Callophyllis variegata*: suministro controlado de esporas para el cultivo comercial. Actualmente, dirige el Centro Acuícola Pesquero de Investigación Aplicada en la Universidad Santo Tomás en Puerto Montt (Chile). Ha realizado diversas publicaciones y sus principales líneas de investigación incluyen tecnologías de cultivo, reproducción y biología de macroalgas marinas.

BALTAZAR, Paul

Biólogo con Mención en Biología Pesquera por la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM, Perú). Con estudios de Maestría en Manejo de Recursos Acuáticos con mención en Acuicultura (UNMSM) y Maestría en Gestión Pesquera en la Universidad Nacional del Callao (Perú). Ha cursado diversos estudios de posgrado en la Universidad Católica del Norte (Chile), el Programa de Doctorado en Ciencias Aplicadas de la Universidad de Antofagasta (Chile) y el Instituto Gallego de Formación en Acuicultura (IGafa) en Illa de Arousa, España. Ha sido jefe del ex Centro de Acuicultura Tambo de Mora-FONDEPES y del Laboratorio de Larvicultura Experimental del Centro de Investigaciones Acuícolas de Calango, en la Facultad de Ciencias Veterinaria y Biológicas UCSUR (Perú). Asimismo, ha trabajado tanto en el sector público como en el privado, colaborando con empresas como Mariexport, PRODUMAR, IPECMAR, FONDEPES. Actualmente, es director de Investigación y Producción Intelectual de la Sociedad Peruana de Acuicultura, así como docente e investigador a tiempo completo en la Universidad Científica del Sur, en las carreras Profesionales de Biología Marina e Ingeniería Acuícola, además de desempeñarse como jefe del Laboratorio de Investigación en Cultivos Marinos (LICMA) e investigador titular de la Dirección General de Investigación, Desarrollo e Innovación de la Universidad Científica del Sur (Perú).

BUSCHMANN, Alejandro

Biólogo Marino por la Universidad de Concepción y Doctor en Biología, con mención en Ecología de la Pontificia Universidad Católica (Chile). Actualmente, ejerce como profesor titular en el Centro de investigación i-mar de la Universidad de Los Lagos (Chile), investigador titular del Programa Basal de ANID del Centro Biotecnología y Bioingeniería (CeBiB, Chile) e investigador senior del Núcleo Milenio de Agronomía Marina (MASH). Cuenta con más de 160 publicaciones científicas sobre diversos aspectos de la ecología y el cultivo de algas marinas, así como sobre acuicultura sostenible.

CAMUS, Carolina

Profesora Asociada e investigadora del Centro i-mar & CeBiB de la Universidad de Los Lagos (Chile) y directora del Núcleo Milenio de Agronomía Marina de Holobiontes de Algas (MASH). Magister en Ciencias Biológicas y Doctora en Ciencias Biológicas con mención en Ecología por la Pontificia Universidad Católica (Chile). Realizó su posdoctorado en el *Centre for Biotechnology and Bioengineering*, CeBiB. Cuenta con 15 años de experiencia en desarrollo del cultivo sostenible de macroalgas, con un enfoque en la comprensión de los factores clave que determinan la productividad en sistemas de cultivo y la identificación de sus limitaciones. Ha trabajado en programas de mejoramiento genético de macroalgas y conservación de germoplasmas, contribuyendo al desarrollo de la agronomía marina y la domesticación de especies de macroalgas. Ha participado en proyectos científicos tanto nacionales como internacionales en el ámbito del cultivo de algas de importancia económica y ha trabajado como consultora científica para empresas nacionales e internacionales. Es autora de más de 30 publicaciones científicas y capítulos de libros.

DUPUY, Juan Diego

Licenciado en Biología por la Universidad Ricardo Palma (Perú), con estudios de especialización en algas marinas de la Universidad de Washington (Estados Unidos de América). Cuenta con más de 20 años de experiencia en el sector. Desde 2004, es director de la empresa peruana PSW S.A., donde actualmente lidera el programa de investigación para el desarrollo de nuevos cultivos de macroalgas y el abastecimiento de materia prima. Ha participado en el establecimiento de la

Resolución Ministerial N°839-2008-PRODUCE, normativa peruana que prohíbe la extracción, transporte, comercialización y procesamiento de algas marinas pardas en el litoral del país. Ha dirigido programas de producción de semillas y cultivos de macroalgas a nivel nacional a través del Fondo para la Innovación, Ciencia y Tecnología (FINCYT), PLUSPETROL y SAVIA PERÚ. En 2022, participó como consultor en la revisión técnica y actualización del estudio prospectivo *Cadena de valor de macroalgas*, dirigido por el Programa Nacional de Innovación en Pesca y Acuicultura (PNIPA) del Ministerio de la Producción (PRODUCE).

FARÍAS MOLINA, Ana

Profesora titular de la Universidad Austral (UACH) en la sede de Puerto Montt (Chile). Licenciada en Ciencias con mención en Biología por la Universidad de Chile y Doctora en Biología por la Universidad de Barcelona (1991), donde realizó su tesis en el Instituto de Acuicultura de Torre de la Sal del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IATS-CSIC) en España. Inició su carrera científica en el Laboratorio Biológico-Pesquero de Putemún, centro del Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) en Castro (Chile). En el ámbito docente, comenzó su labor en la sede Puerto Montt de la UACH, donde lideró la creación de los programas de Doctorado en Ciencias de la Acuicultura (2009) y del Magíster en Nutrición Acuícola (2019), siendo la primera directora de ambos programas. Su investigación se ha centrado en los efectos de los niveles de proteína, la relación proteína/energía y los ácidos grasos en la nutrición de moluscos y peces, especialmente en sus etapas larvares y juveniles, con el objetivo de contribuir a la diversificación de la acuicultura nacional. A lo largo de su trayectoria científica, ha publicado más de 50 artículos indexados, ha dirigido numerosas tesis de pregrado y de posgrado, así como proyectos de investigación básica y aplicada en acuicultura.

FAUGERON, Sylvain

Ecologista evolutivo, apasionado por el estudio de los procesos que determinan la distribución de las algas a lo largo de la costa peruano-chilena. Sus líneas de investigación incluyen: ecología evolutiva de las algas marinas, genética de poblaciones de especies marinas, adaptación a la variabilidad ambiental (incluidos los impactos humanos) y ecología y evolución de bosques de algas. Es Doctor en Ciencias de la Vida y la Salud por la Universidad de Ciencias y Tecnología de Lille, en Francia. Actualmente, es profesor asociado a tiempo completo en la Facultad de Ciencias Biológicas de la Pontificia Universidad Católica (Chile). Su trabajo actual se centra en la identificación de rastros genómicos de divergencia adaptativa en algas marinas a lo largo del gradiente latitudinal y en cómo esto se relaciona con la dinámica de población local y los sistemas de apareamiento. Además, es codirector del CNRS UMI-EBEA (Laboratorio Internacional de Biología Evolutiva y Ecología de Algas).

GATICA, Sebastián

Magister en Ciencias y Doctor por la *University College London* (UCL, Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte). Ingeniero Comercial por la Pontificia Universidad Católica (Chile), emprendedor social, académico y director de CoLab UC. A lo largo de su trayectoria, ha trabajado en diversos ámbitos vinculados a la economía social. Como académico y consultor, ha publicado numerosos estudios y trabajos académicos que han contribuido al debate sobre emprendimiento, empresas y la economía social tanto en Chile como en América Latina. En su faceta como emprendedor, ha impulsado la creación de diversas fundaciones y empresas sociales, entre ellas TECHO, Travolution y los proyectos regenerativos Carnes Manada y Huiro Regenerativo (www.huiroregenerativo.com/). Este último, dedicado al policultivo de macroalgas, ha sido recientemente galardonado con el Premio Nacional de Innovación y Cambio Climático Avonni. Asimismo, es uno de los beneficiarios de un programa de innovación tecnológica de CORFO, centrado en el desarrollo y fomento de la cadena de valor de *Macrocystis pyrifera*.

GODOY, Cecilia

Licenciada en Ciencias con mención en Biología por la Universidad de Chile y Magíster en Ciencias, con mención en Ecología por la Universidad Austral de Chile, con formación complementaria en estudios sistémicos y de regeneración social. Con una amplia trayectoria de más de 30 años, ha colaborado con organizaciones públicas y privadas, asociaciones de pescadores y recolectoras artesanales, comunidades indígenas y gobiernos locales, regionales, nacionales e internacionales. Su trabajo ha sido clave en la formación de redes de trabajo y en la asesoría en el manejo y gobernanza marino-costera, áreas marinas protegidas, acuicultura de pequeña escala, adaptación al cambio climático y turismo sostenible. Ha participado en proyectos del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), la FAO, Cooperación Económica Asia-Pacífico (APEC) y la Alianza del Pacífico, contribuyendo al desarrollo de iniciativas pioneras junto a comunidades costeras y promoviendo el reconocimiento del papel de la mujer en la vida comunitaria. Desde 2009, es socia fundadora de la Fundación Bordemar, dedicada a la divulgación científica, la educación ambiental y el turismo sostenible. Su labor se basa en enfoques creativos y participativos, para acercar la ciencia y sus mejores prácticas a la comunidad. Con el apoyo de fondos de gobiernos regionales, organizaciones públicas a nivel nacional e internacional y financiación global (*Global Grants*), la Fundación impulsa el desarrollo sostenible desde una perspectiva ambiental, cultural, social y económica. Su impacto se extiende al borde costero, las cuencas hidrográficas y territorios asociados, con un enfoque especial en la Región de Los Lagos, así como en Chile y América Latina en general.

HUGHES, Melanie

Doctora en Biología y Licenciada en Ciencias Biológicas por la Universidad Nacional del Sur (Argentina). Realizó su tesis doctoral en el Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS, CONICET-UNS), donde formó parte del Laboratorio de Estudios Básicos y Biotecnológicos en Algas (LEBBA). Durante este período, investigó diversos aspectos reproductivos y de cultivo de dos algas rojas de la Patagonia argentina, así como aplicaciones innovadoras de sus carragenanos. Además, realizó pasantías en el Centro de Investigaciones en Hidratos de Carbono (CHIDECAR, UBA-CONICET). Su investigación posdoctoral, desarrollada en la Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI, UNS-CONICET), se centró en el estudio de las propiedades reológicas y mecánicas de carragenanos. Ha participado en proyectos de investigación sobre el cultivo y extracción de compuestos de algas nativas. Es miembro de la Asociación Argentina de Ficología (AAF) y de la Red de Macroalgas Marinas de Argentina (REMMAR). Actualmente, se desempeña como ayudante de docencia en la Universidad Nacional del Sur (Argentina).

LEAL, Pablo

Doctor en Filosofía por la Universidad de Otago (Nueva Zelanda) y Licenciado en Biología Marina, por la Universidad de Los Lagos (Chile). Actualmente, es investigador semi-senior en el Departamento de Repoblación y Cultivo del Instituto de Fomento Pesquero, en Chile. Ha participado en diversos proyectos sobre ecofisiología y cultivo de macroalgas y, en la actualidad, su investigación se centra en el estudio de los beneficios de los cocultivos de macroalgas y bivalvos como estrategia para mitigar los efectos del cambio climático en la acuicultura a pequeña escala. Ha publicado artículos científicos sobre los efectos del cambio climático (acidificación y calentamiento oceánico) en las etapas macroscópicas y reproductivas de macroalgas de importancia económica y ecológica.

LOVATELLI, Alessandro

Biólogo y acuicultor de profesión, obtuvo su Licenciatura y su Maestría en Ciencias en las Universidades de Southampton y Plymouth (el Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte, respectivamente). Su primera experiencia con la FAO se remonta a 1987, cuando trabajó como experto en bivalvos en un proyecto regional de la FAO/PNUD. Posteriormente, fue asignado a México, donde colaboró en el proyecto regional de desarrollo de acuicultura (AQUILA), financiado por el Gobierno italiano. Entre 1993 y 1997, trabajó en Viet Nam, Somalia y después nuevamente

en el sudeste asiático. En Viet Nam, dirigió el componente de acuicultura y pesquerías de un proyecto de la Unión Europea, que incluyó, entre otras actividades, la creación de 10 centros de demostración, formación y extensión acuícola. En Somalia, se desempeñó como consultor principal en acuicultura y pesquerías para la Comisión Europea. Tras un nuevo período en Viet Nam como líder de equipo en un proyecto financiado por Dinamarca, la FAO lo volvió a contratar como asesor de acuicultura adjunto al proyecto FAO-EASTFISH, con base en Dinamarca. En 2001, se reincorporó nuevamente a la FAO. De 2016 a 2020, trabajó en la oficina regional de la FAO en Santiago (Chile) como oficial de pesca y acuicultura. Actualmente, sus principales actividades se centran en el desarrollo de la acuicultura marina, la transferencia de tecnología de cultivo y el manejo de recursos. Asimismo, ha elaborado una serie de documentos técnicos en apoyo al sector del cultivo de bivalvos.

MARQUEZ, Adrián

Docente de la Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar (FIMCM) e investigador del Centro Nacional de Acuicultura e Investigaciones Marinas (CENAIM) de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Cuenta con 15 años de experiencia en el ámbito de la acuicultura aplicada. Es Licenciado en Biología Fundamental por la Universidad de Oriente (UDO, República Bolivariana de Venezuela) y Maestría en Ciencias Marinas en el Instituto Oceanográfico (República Bolivariana de Venezuela). Es autor de 26 publicaciones en revistas arbitradas y ha participado en proyectos de desarrollo tecnológico en el cultivo de moluscos y macroalgas marinas. Sus principales áreas de investigación incluyen el desarrollo y optimización de cultivo integral de moluscos bivalvos, la modulación ambiental en el crecimiento de invertebrados marinos, y los cultivos funcionales de macroalgas con aplicaciones nutraceuticas. Además, tiene un marcado interés en la salud animal.

MURÚA, Pedro

Doctor en Ciencias Biológicas de la Universidad de Aberdeen (Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte) e Ingeniero en Acuicultura de la Universidad Austral (Chile). Actualmente es profesor auxiliar de la Universidad Austral y director del Magister en Medio Ambiente y Bioseguridad en Acuicultura. Además, forma parte del cuerpo docente de la escuela de Ingeniería Ambiental y del claustro del Doctorado en Acuicultura de la misma universidad, en su sede en Puerto Montt (Chile). Con cerca de 20 años de experiencia, ha trabajado en temas relacionados con acuicultura, ecología y repoblamiento de macroalgas de importancia comercial. Su principal área de investigación es la ficopatología, con un enfoque en la diversidad y epidemiología de patógenos en algas chilenas y antárticas, los mecanismos de resistencia de macroalgas marinas y la bioseguridad en la acuicultura de macroalgas. Ha dirigido proyectos de investigación financiados tanto a nivel nacional (Fondecyt; INACH) como por fondos europeos (*GlobalSeaweedSTAR*, *Safe Seaweed Coalition*). Actualmente, dirige proyectos asociados al estudio de dinámicas de pestes algales de *Gracilaria chilensis* y su biocontrol natural mediante patógenos, así como la identificación y el estudio de dinámicas de parásitos algales en especies chilenas de importancia comercial y en especies antárticas.

NILO, Teresa

Líder territorial y recolectora de algas en la comuna de Freirina, caleta La Reina (Atacama, Chile), desde 1988. Dedicó los 365 días del año a la recolección, barreteo, fardeo, tendido y secado de tres tipos de algas: huero negro, huero palo y huero flotador. Como presidenta del sindicato La Reina, en 2019 logró la asignación de un Área de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos por parte del Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (SERNAPESCA). Es miembro de la Corporación Nacional de la Mujer de la Pesca Artesanal de Chile, que recientemente consiguió la incorporación de dos categorías nuevas al Registro de Actividades Conexas, una de ellas la de amarradoras o enfardadoras de algas. Actualmente, es una de las representantes de la Coordinadora Nacional de Algueras y Algueros de Chile (CONAACH), organización que busca el reconocimiento de las praderas de algas como un ecosistema clave para el equilibrio ambiental de la costa chilena,

así como la valorización de la alquería como una actividad esencial para la subsistencia de más de 20 000 familias a lo largo de toda la costa chilena. Además, es impulsora de una cooperativa en su caleta conformada por mujeres.

PARADA, Javier

Ingeniero en Alimentos de la Universidad Austral y Doctor en Ciencias de la Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica, ambas de Chile. Desde 2010, es académico en la Facultad de Ciencias Agrarias y Alimentarias de la Universidad Austral de Chile (UACh). Es responsable y colaborador de varias asignaturas relacionadas con la ciencia y tecnología de los alimentos, tanto en pregrado como en posgrado. Su línea de investigación se ha centrado en el estudio de la relación entre compuestos bioactivos, la microestructura de alimentos y sus propiedades saludables, con un enfoque especial en la digestibilidad del almidón y la respuesta glicémica. Ha publicado más de 30 publicaciones y cuatro capítulos de libros. Ha participado en más de 15 proyectos de investigación (FIC-R Los Ríos y FONDECYT, entre otros), de los cuales ha dirigido nueve. Varios de estos proyectos están orientados al aprovechamiento de los recursos naturales, en particular de las algas marinas, para la obtención de ingredientes saludables. Además, ha sido miembro de Grupo de Evaluación FONDECYT de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) de Chile, y evaluador externo de programas de posgrado para la Comisión Nacional de Acreditación (CNA) de Chile. Cuenta con numerosas presentaciones en congresos nacionales e internacionales.

RINCONES, Raúl

Biólogo Marino y Acuicultor de profesión. Licenciado en Ciencias Marinas por la Long Island University de Nueva York (Estados Unidos de América). Realizó estudios doctorales en la Universidad de Uppsala (Suecia) en Fisiología de Algas. Es director fundador de Agromarina BIORMA Aquaculture C.A., empresa dedicada al cultivo y comercialización de algas marinas en la Isla de Margarita, en la República Bolivariana de Venezuela. Cuenta con cerca de 40 años de experiencia en el cultivo, transformación, procesamiento industrial y comercialización de organismos marinos y sus productos, con particular énfasis en especies de macroalgas marinas tropicales. Ha trabajado directamente con comunidades costeras rurales en Arabia Saudita, Belice, el Brasil, Colombia, el Ecuador, México, Mozambique, Panamá, las Pequeñas Antillas (Granada, San Vicente y las Granadinas, Santa Lucía), la República Bolivariana de Venezuela, la República Unida de Tanzania, Túnez, Türkiye y Viet Nam. Su labor ha abarcado el diseño, promoción e implementación de programas de maricultura rural de algas marinas y pesca artesanal, así como la investigación aplicada, bioprospección y valorización de recursos marinos. Además, ha liderado programas de capacitación y asistencia técnica a pobladores y acuicultores. La mayoría de estas iniciativas se han desarrollado con el apoyo de varios gobiernos, entidades privadas y agencias de cooperación internacional en América Latina, el Mediterráneo, el sudeste asiático, Oriente Medio y el este de África. Actualmente, trabaja como consultor de la FAO en Arabia Saudita para el desarrollo de la maricultura de algas.

ROBLEDO, Daniel

Doctor en Ciencias del Mar por la Universidad Autónoma de las Islas de Gran Canaria, en España, con licenciatura en Oceanografía por la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) en México. Desde 1994, es investigador titular en el Departamento de Recursos del Mar del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV), Unidad Mérida. Su investigación con macroalgas marinas tropicales abarca diversas áreas, como biotecnología vegetal, ecología y fisiología; cultivo y micropropagación, así como la valoración de metabolitos secundarios. Ha publicado 105 artículos indexados y ha formado a 27 investigadores de posgrado (13 de maestría y 14 de doctorado). Ha dirigido numerosos proyectos de investigación sobre algas marinas tropicales y, en la actualidad, cuenta con financiación del programa ARPA-e “*Development of Techniques for Tropical Seaweed Cultivation*” del Departamento de Energía de los Estados Unidos de América. Además, elabora estudios financiados por la Secretaría de Pesca y Acuicultura Sustentables del Gobierno del Estado de Yucatán, centrados en el desarrollo pesquero y acuícola, como “Sistemas

integrados macroalgas-ostión en Ría Lagartos” y “Cultivo de algas en Dzilam de Bravo”. Fue Presidente del Consejo de la International Seaweed Association (ISA) durante el período 2019-2023 y es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (sin) Nivel 3. Ha colaborado con la FAO, participando en la elaboración del documento técnico “*Social and economic dimensions of carrageenan seaweed farming*”, publicado en 2013.

SEPÚLVEDA, Miguel

Graduado y especializado en Biología Marina en la Universidad Federal Fluminense (UFF) de Brasil. Realizó estudios de Ficología y Cultivo de macroalgas con el Dr. Bernabé Santelices en la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC) y en la Estación Costera de Investigaciones Marinas (ECIM). Cuenta con 25 años de experiencia en la producción y procesamiento de macroalgas en el sector privado. Ha desarrollado varios proyectos como consultor en cultivo de macroalgas en Chile, el Brasil, el Ecuador, el Perú, la República Unida de Tanzania, Zanzíbar, Marruecos, Mozambique, Namibia, Panamá y Túnez, asesorando su uso en diversas industrias. En algunos de estos países, ha trabajado en conjunto con gobiernos locales para la implementación de políticas estratégicas orientadas a la introducción de especies exóticas de macroalgas en comunidades pesqueras y empresas privadas. Actualmente, es CEO de la empresa Seaweed Consulting (www.seaweedconsulting.com) en el Brasil, donde lidera diferentes proyectos y consultorías a nivel nacional e internacional.

VALENTI, Wagner

Biólogo y Doctor en Ciencias Biológicas por la Universidad de São Paulo en el Brasil. Ha recibido numerosos premios y distinciones tanto a nivel nacional como internacional, incluido el prestigioso título de “*Fellow*” de la Sociedad Mundial de Acuicultura. Actualmente, ejerce como profesor-investigador científico principal en el Centro de Acuicultura de la Universidad Estatal Paulista (UNESP), en el Brasil. También es coordinador de la Red Brasileña de Acuicultura Sostenible, editor ejecutivo de *Aquaculture Reports* (Elsevier) y editor jefe de la sección de la revista *Fishes* (MDPI). Durante los últimos 40 años, ha contribuido al desarrollo de la acuicultura a través de la docencia, la I+D, así como en la formulación de políticas nacionales. Ha creado y dirigido nuevas instituciones y programas de posgrado, ha liderado redes de investigación y ha ocupado cargos internacionales. Es autor de más de 200 artículos, libros, capítulos de libros y artículos científicos sobre acuicultura y biología acuática. Además, cuenta con patentes y ha fundado *startups* tecnológicas. Ha participado activamente en la organización de numerosos congresos nacionales e internacionales y ha sido seleccionado en varias ocasiones como el orador principal o plenario. Su trabajo de investigación incluye la evaluación de la sostenibilidad, la acuicultura integrada, el cómputo de nutrientes y la bioeconomía.

ZERTUCHE GONZÁLEZ, José

Doctor en Oceanografía y Maestría en Manejo Costero por la Universidad Estatal de Nueva York, en los Estados Unidos de América, con licenciatura en Oceanografía, por la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) en México. En 1985, se incorporó al Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO) de la UABC. Obtuvo el Premio al Mérito Académico en el Área de Ciencias Naturales y Exactas de la UABC (1993) y en el área de Ciencias Agrícolas (2020), este último en reconocimiento a su contribución al desarrollo de la Agronomía Marina en México. Fue director del IIO entre 2001 y 2005. Es autor de 81 artículos arbitrados, cinco publicaciones de la FAO y 13 capítulos en libros. Ha dirigido 15 tesis de licenciatura, 15 de maestría y siete de doctorado. Ha sido conferencista invitado en Chile, China, Cuba, el Brasil, el Canadá, la Federación de Rusia, la República Bolivariana de Venezuela, la República de Corea, los Estados Unidos de América, Noruega y ha sido profesor visitante en la Universidad de Connecticut (2001) y en la Universidad de Jinan, China (2013–14). Es asesor de compañías nacionales e internacionales dedicadas al aprovechamiento de las algas marinas. Sus investigaciones fueron clave para el establecimiento de la primera granja comercial de macroalgas en México. En 2017, fue nombrado investigador emérito por la UABC.

Anexo 5 – Fotografía de grupo

FOTO DE GRUPO DE TODOS LOS EXPERTOS ASISTENTES AL TALLER TÉCNICO REGIONAL DE LA FAO SOBRE EL ESTADO Y PERSPECTIVAS DEL CULTIVO DE MACROALGAS EN AMÉRICA LATINA CELEBRADO EN CHILE DEL 24 AL 26 DE JUNIO DE 2024.



©FAO/J. Aguilar-Manjarrez

De derecha a izquierda: C. Agurto, M. Sepulveda, M. Hughes, W. Valenti, A. Buschmann, A. Márquez, A. Luna, S. Gatica, J. Avila, T. Nilo, P. Murúa, C. Camus, P. Baltazar, P. Leal, J. Aguilar-Manjarrez, D. Robledo, C. Godoy, M. Amaral, V. Espinoza, A. Lovatelli, M. Avila, J. Dupuy, S. Faugeron, A. Farías, M. Alvarez, F. Araos, J. Parada.

Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina

Taller Técnico Regional de la FAO
24-26 de junio de 2024
Puerto Varas, Chile

El cultivo de macroalgas en América Latina y el Caribe representa una oportunidad estratégica para impulsar la seguridad alimentaria, la sostenibilidad ambiental y el desarrollo económico regional. Aunque la producción mundial ha experimentado un crecimiento sostenido, la participación de América Latina y el Caribe sigue siendo reducida, con apenas un 2 % del volumen total reportado, lo que pone de manifiesto un gran potencial de expansión.

Para abordar esta situación, la FAO organizó en junio de 2024 el taller "Estado y perspectivas del cultivo de macroalgas en América Latina" (ACUIALGAS), en Puerto Varas, Chile. Participaron 27 expertos y expertas de siete países, quienes analizaron seis áreas clave: alimentación y biotecnología, gobernanza, servicios ecosistémicos, tecnología, inclusión social y cadenas de valor.

Se puso en valor el perfil nutricional y biotecnológico de las macroalgas, así como su potencial como alimentos funcionales y saludables. En cuanto a gobernanza, se identificó la necesidad de marcos regulatorios claros, una planificación costera integrada y trámites más eficientes. También se enfatizó el papel de las macroalgas en la provisión de servicios ecosistémicos como la captura de carbono y la mejora de la calidad del agua, promoviendo enfoques como la acuicultura multitrofica integrada.

A nivel técnico, se subrayó la importancia de fortalecer el desarrollo tecnológico, aplicar biotecnología e inteligencia artificial, y capacitar a las comunidades costeras. El cultivo de macroalgas se reconoció además como una vía para generar empleo digno y promover la equidad de género y la inclusión de la juventud. Finalmente, se destacó el potencial de diversificar productos derivados y acceder a nuevos mercados.

El taller concluyó con una serie de recomendaciones dirigidas a la FAO, los gobiernos y la industria para articular esfuerzos, fortalecer capacidades y promover políticas que impulsen el desarrollo sostenible de la acuicultura de macroalgas en América Latina.

ISBN 978-92-5-139807-4 ISSN 2071-1026



9 789251 398074

CD5237ES/1/06.25